

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE PALMA DE MALLORCA

= = = = =

RADIACION SOLAR SOBRE LADERAS: APLICACION A LOS TALUDES
COSTEROS DEL SW DE MALLORCA, Y RELACION CON LA VEGETACION.

Trabajo que presenta para
optar al grado de licenciado
en ciencias biológicas
JOSE-ANTONIO GUIJARRO PASTOR

El interesado:

José A. Guijarro

D. JOSE A. GUIJARRO PASTOR

Vº Bº, el director
del trabajo:

Leonardo Llorens

DR. D. LEÓNARDO LLORENS GARCIA

A Lucia .

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar aquí mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido de algún modo a este trabajo, y especialmente al Dr. D. Leonardo Llorens por la dirección del mismo; al Dr. D. Antonio Escarré, tanto por la aplicación del programa GOWER en el centro de cálculo de la Universidad de Alicante, como por sus comentarios sobre la interpretación de los resultados obtenidos con dicho programa; y a D. Antonio Font por su ayuda en la transcripción al lenguaje BASIC del programa de cálculo de irradiaciones.

Agradezco también al Centro Meteorológico Zonal de Palma de Mallorca las muchas facilidades dadas para la consulta de los ficheros climatológicos.

= = = = =

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
1. Introducción	1
1.1. Propósito del trabajo	1
1.2. Zona de aplicación	1
1.2.1. Situación y geología	1
1.2.2. Climatología	3
1.2.3. Vegetación y fauna	12
2. Métodos	16
2.1. Cálculo de la radiación solar sobre laderas	16
2.1.1. Antecedentes y planteamiento	16
2.1.2. Estimación del cociente entre la radiación directa recibida en una superficie inclina- da y la recibida en la horizontal (Q_1/Q) ..	18
2.1.3. Estimación del cociente entre las radiacio- nes difusa y global recibidas en una super- ficie horizontal (k)	24
2.1.4. Evaluación de la radiación solar recibida por una superficie inclinada	25
2.2. Realización de los inventarios de vegetación	26
2.3. Ordenación de los inventarios	27
2.4. Análisis de correlación	28
3. Resultados	29
3.1. Simulación con el modelo para el cálculo de la ra- diación solar	29
3.2. Radiación solar recibida en las estaciones de in- ventario	29
3.3. Inventarios de vegetación realizados	29
3.4. Ordenación de los inventarios	41
3.5. Análisis de correlación	42

	<u>Pág.</u>
4. Discusión	51
4.1. Del método de cálculo de la irradiación	51
4.1.1. Sobre la variación de la radiación difusa recibida por una superficie inclinada	51
4.1.2. Sobre el efecto de ponderación de Q_1'/Q' cuando el sol está próximo al horizonte ...	54
4.1.3. Sobre el intervalo de integración	56
4.1.4. Sobre la estimación de k	56
4.1.5. Sobre el comportamiento global del modelo .	68
4.2. De la simulación	71
4.2.1. Sobre el efecto de la inclinación y orien- tación de la pendiente en la radiación so- lar recibida	71
4.2.2. Sobre los errores inducidos por imprecisión en las medidas de la inclinación y orienta- ción de la pendiente	74
4.3. De los resultados de la aplicación a las estacio- nes de inventario	80
4.4. De los inventarios de vegetación realizados, y su ordenación	80
4.5. De las relaciones irradiación-vegetación	85
5. Conclusiones	94
6. Bibliografía	95
Apéndice 1.- Irradiación solar diaria en ausencia de at- mósfera	101
Apéndice 2.- Programa en lenguaje BASIC para el cálculo de la irradiación de superficies inclinadas	103
Apéndice 3.- Radiación solar: terminología y conversión de unidades	104

= = = = =

1. INTRODUCCION

1.1. Propósito del trabajo

La radiación solar es un elemento climático de primer orden, no sólo por sí mismo, sino también por influir en gran manera sobre otros elementos no menos importantes como son la temperatura y la humedad, tanto del suelo como del aire, y la evaporación. Su importancia para la distribución de las especies vegetales y animales es en consecuencia enorme, influyendo directa o indirectamente en el desarrollo y funciones biológicas de los organismos.

La cantidad de radiación solar recibida por una superficie (o irradiación solar de dicha superficie) depende en gran medida de su inclinación y orientación, factores que se suele incluir en los inventarios que se realizan en estudios de ecología terrestre. El propósito de este trabajo es desarrollar un método que permita el cálculo de la irradiación solar en función de esos dos parámetros, y aplicarlo a una zona concreta de estudio, examinando las posibles relaciones entre los valores obtenidos y la vegetación.

1.2. Zona de aplicación

1.2.1. Situación y geología

Para la aplicación del método se procuró escoger una zona que aparte de las variaciones de inclinación y orientación del terreno ofreciera una relativa homogeneidad en cuanto a los demás factores abióticos. Los taludes costeros del sector SW de Mallorca, entre Cap Enderrocat y Cap Blanc, ofrecieron una buena aproximación a estos requerimientos, con una altitud uniforme, una influencia marítima siempre presente, y un sustrato geológico sin grandes variaciones. Estos taludes están formados por derrumbes de un acantilado de 80 a 100 m de altitud, que es el borde costero de una amplia plataforma que se extiende por la comarca de Sa Marina

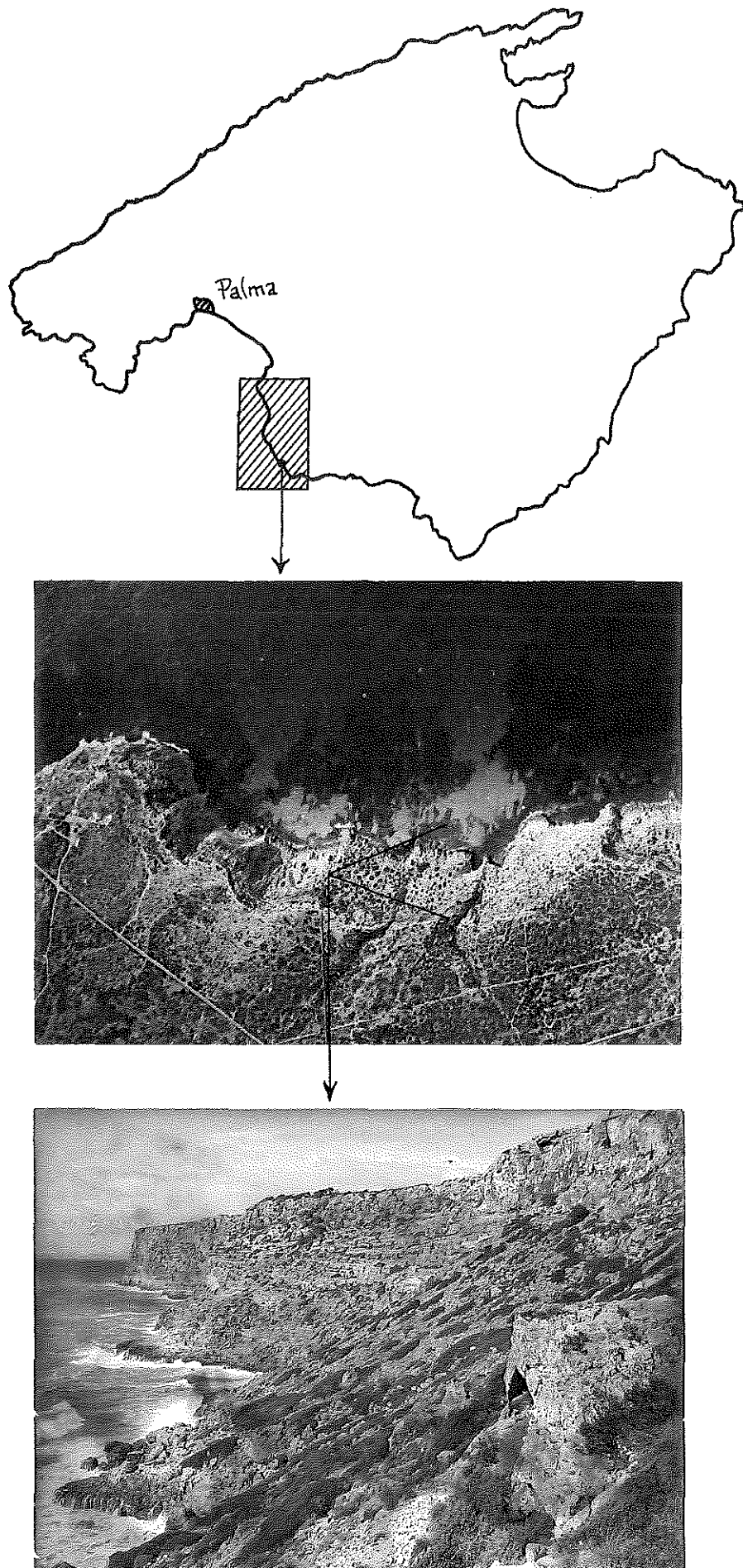


Fig. 1.- Localización de la zona de estudio.

de Llucmajor, y que está formada por los bancos tabulares del Vindoboniense marino. En los propios taludes, entre los 60 y 90 m de altura, se observan a veces fragmentos de antiguas dunas cuaternarias, semidestruídas por ulteriores transgresiones marinas, y posteriormente meteorizadas. Más hacia abajo se hacen más reconocibles algunas formaciones cuaternarias, especialmente del Pleistoceno superior. Además de todo ello se observan abundantes masas de elementos detríticos desprendidos de las zonas más elevadas (CUERDA y SACARES, 1965).

En la figura 1 se da un mapa con la localización de la zona, y dos fotografías ilustrativas del aspecto que ofrece, concretamente en el lugar denominado "Pas de Sa Senyora".

1.2.2. Climatología

En los extremos de la zona de aplicación disponemos de dos estaciones climatológicas de la red de colaboradores del I.N.M., El Arenal al norte, que es termopluviométrica, y Cabo Blanco al sur, sólo pluviométrica. Para otros elementos climáticos hemos de acudir a observatorios de la red principal, siendo los más próximos el del Aeropuerto de Son San Juan y el del Centro Meteorológico, sito en el puerto de Palma, y único éste en el que se realizan medidas de irradiación solar en Mallorca.

Los datos medios mensuales de precipitaciones y temperaturas aparecen en la tabla 1, en la que también se dan las mínimas absolutas en los meses en que éstas han sido iguales o inferiores a 0°C. Con estos datos se ha confeccionado el diagrama ombrotérmico de la figura 2, con la particularidad de haber trazado en él dos gráficas de pluviometría, una para cada estación. Se intenta de este modo abarcar todo el rango de variación de la zona de estudio, aprovechando el hecho de que las estaciones pluviométricas están situadas una en cada extremo, y admitiendo una disminución monótona de la precipitación hacia el sur y una

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
<u>Precipitaciones (mm)</u>													
El Arenal (1960-76)	32	27	29	30	24	18	5	16	45	73	38	48	385
Cabo Blanco(1960-79)	28	20	25	26	20	16	6	14	40	64	38	43	340
<u>Temperaturas (°C)</u>													
Media	10,0	10,5	12,5	15,1	18,6	21,8	25,2	25,7	22,6	18,1	12,9	10,8	17,0
Máxima media	13,8	15,0	17,8	20,8	24,0	26,4	30,0	30,2	27,0	22,0	17,0	14,4	21,5
Mínima media	6,2	6,0	7,2	9,4	13,2	17,2	20,4	21,2	18,2	14,2	8,8	7,2	12,4
Mínima absoluta	-2,0	-1,2	-1,0									-0,8	

Tabla 1.- Precipitaciones y temperaturas en la zona de estudio.

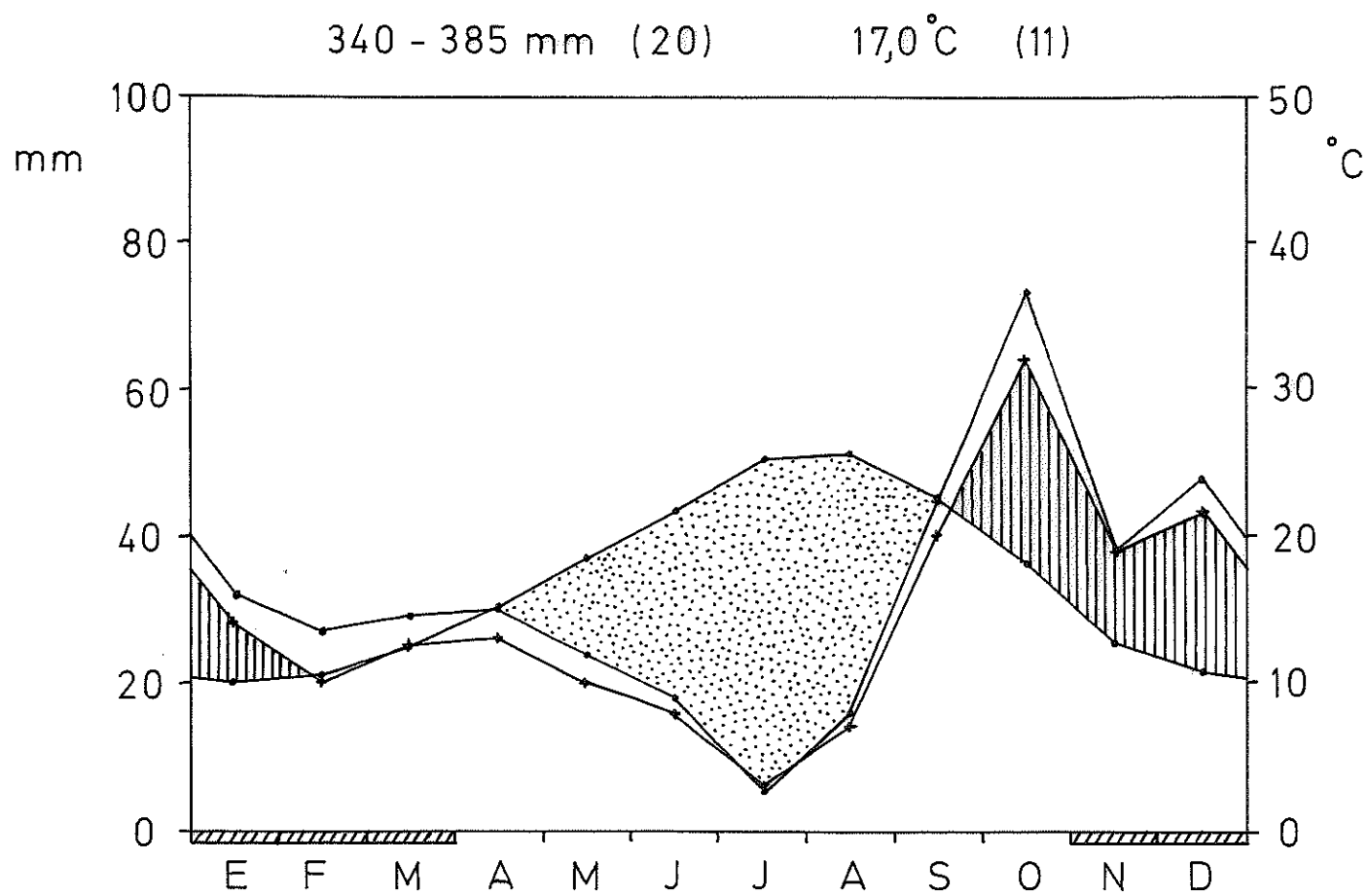


Figura 2.- Diagrama ombrotérmico.

—•— El Arenal
—+— Cabo Blanco

constancia en las temperaturas, cuya variación a escala mesoclimática es muy inferior a la de las precipitaciones. Se observa así en el diagrama que la menor pluviometría hacia el sur se traducirá en un más temprano advenimiento de la época seca estival, mientras que en otoño no tiene mucha importancia debido a la brusca aparición de las lluvias.

Las precipitaciones no sólo ofrecen una gran variabilidad en el espacio, sino también en el tiempo. Estudiando las series anuales desde 1945 se observa una desviación típica de 104 mm en El Arenal y de 89 mm en Cabo Blanco. Como en este periodo las medias respectivas alcanzan 389 y 334 mm, el coeficiente de variación es en ambas estaciones de un 27%. En la figura 3 se presentan los histogramas de precipitaciones anuales de ambas estaciones, en marcas de clase de 50mm.

La humedad en los taludes debe ser en general alta, dada la proximidad del mar. En Son San Juan es superior al 80 % antes de la salida del sol, reduciéndose en las horas centrales del día a un 55-60 % en verano y un 65-70 % en invierno como media (tabla 2).

Para tener una idea de hasta qué punto los valores de temperatura y humedad del Centro Meteorológico y del Aeropuerto difieren de los que se dan en la zona de aplicación, se hicieron algunas determinaciones de estos parámetros en dicha zona, utilizando para ello un termómetro a modo de psicrómetro, previamente calibrado por comparación con los instrumentos del Centro Meteorológico. Comparando estas medidas con las efectuadas en el Centro y en el Aeropuerto (figura 4), se observa que las diferencias no son muy acusadas: tanto la temperatura como la humedad relativa y la tensión del vapor de agua en los taludes presentan valores muy similares o sólo algo superiores a los del Centro y el Aeropuerto. (Hay que apuntar aquí que las medidas de campo no se efectuaron en un punto fijo, sino cada una en un

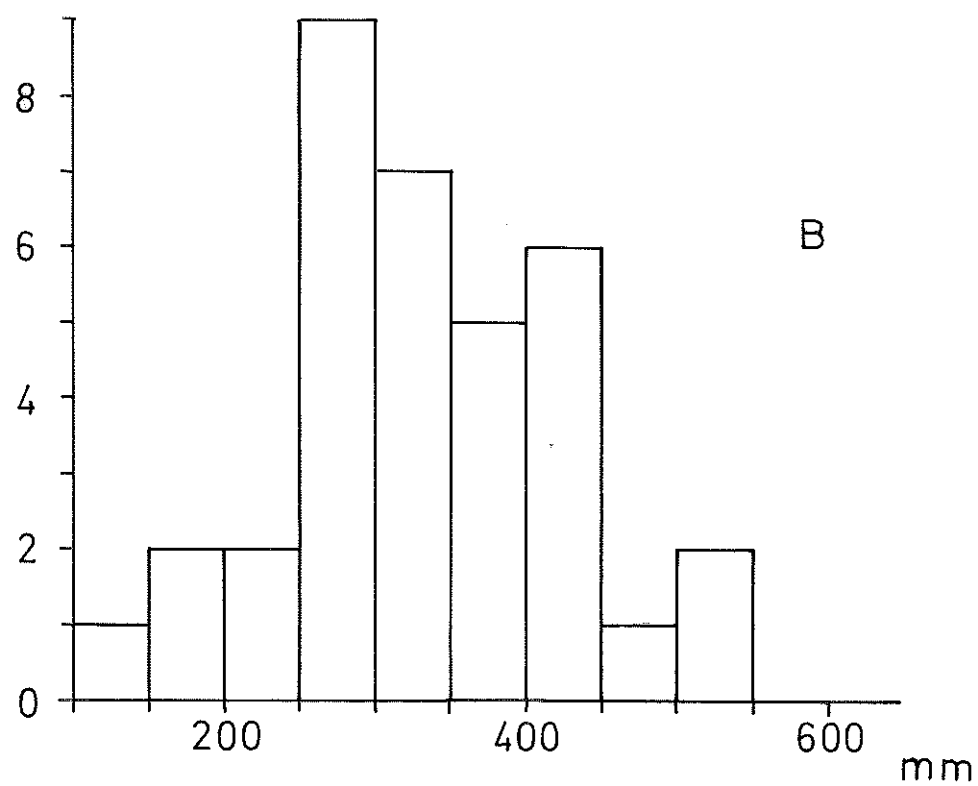
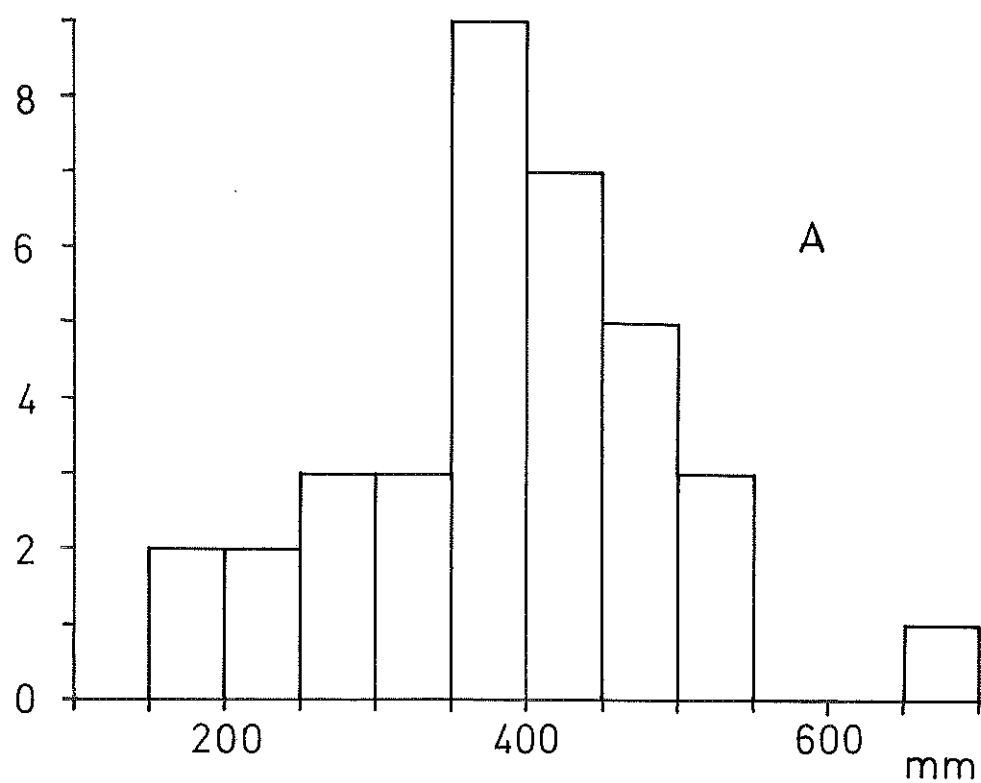


Figura 3.- Frecuencias de precipitaciones anuales en El Arenal (A) y Cabo Blanco (B). (1945-79).

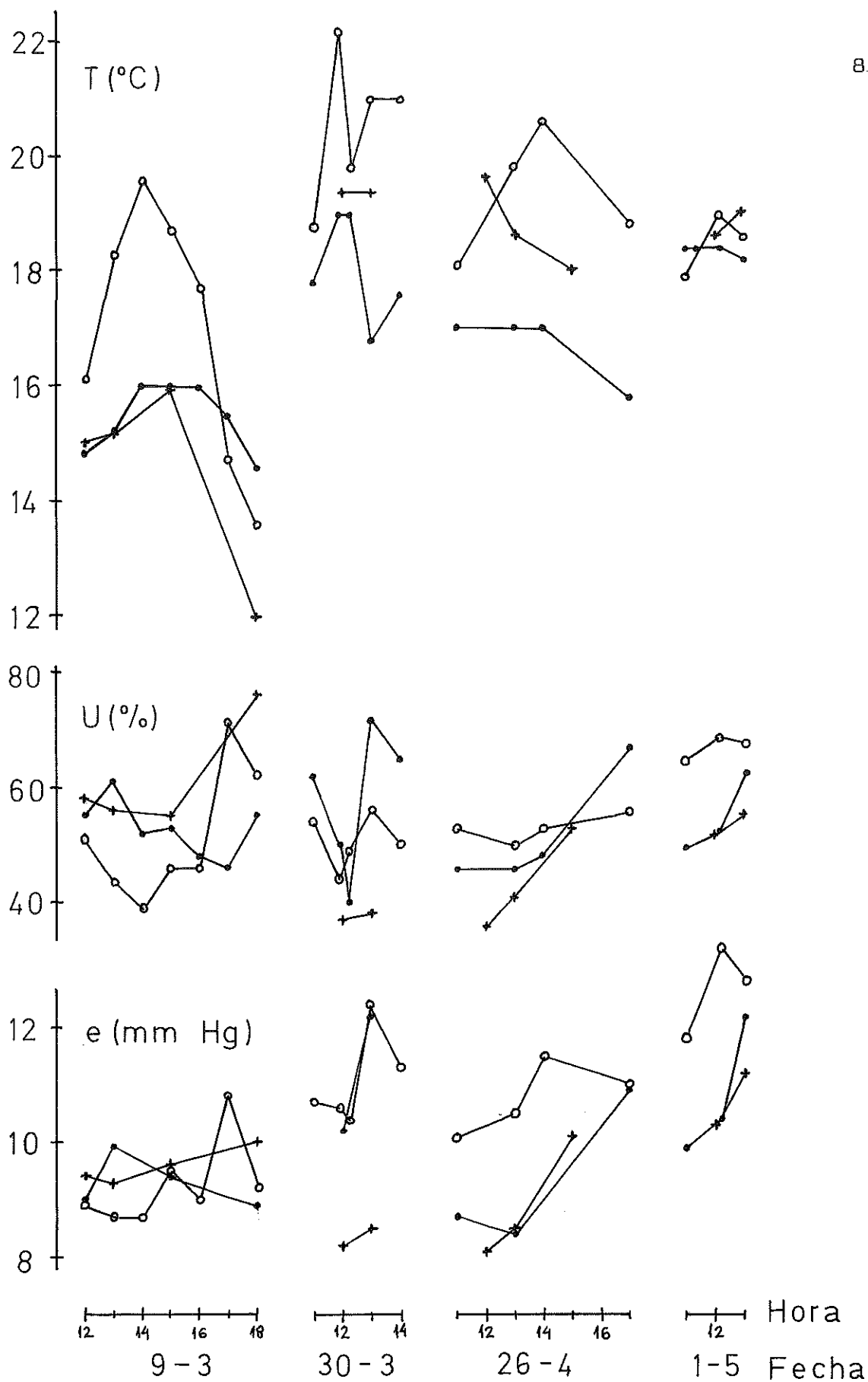


Figura 4.- Comparación de la temperatura (T), humedad relativa (U), y tensión del vapor (e) medidas en los taludes (o-o), con las del Centro Meteorológico (e-o) y el Aeropuerto (+).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
07 h.	88	87	86	84	79	77	76	81	88	89	88	88	84
13 h.	68	64	62	61	59	57	56	58	62	64	64	68	62
Media	78	76	74	72	69	67	66	69	75	77	76	78	73

Tabla 2.- Humedad relativa media (%) a las 07 y 13 horas
T.M.G. en el Aeropuerto de Son San Juan (1961-80).

	NE	E	SE	ES	SW	W	NW	N	Total	
Primavera	35	7	2	26	30	27	58	46	231	
Verano	21	6	1	4	8	4	3	7	54	
Otoño	16	1	1	28	47	21	31	27	172	≥50 Km/h
Invierno	31	2	3	21	78	73	112	69	389	
Año	103	16	7	79	163	125	204	149	846	
Primavera	3	1	-	2	2	8	17	11	44	
Verano	4	-	-	-	1	2	-	1	8	
Otoño	-	-	-	3	9	3	11	5	31	≥70 Km/h
Invierno	3	-	-	3	16	23	39	15	99	
Año	10	1	-	8	28	36	67	32	182	
Primavera	-	-	-	-	-	2	3	1	6	
Verano	-	1	-	1	-	-	-	-	2	
Otoño	-	-	-	-	2	1	4	1	8	≥90 Km/h
Invierno	-	-	-	-	1	3	16	1	21	
Año	-	1	-	1	3	6	23	3	37	

Tabla 3.- Número total de días, en 20 años, en que la racha
máxima del viento fué mayor o igual de 50, 70, y 90 Km/h (1961-80).

lugar diferente de la zona de estudio, y se llegaron a observar diferencias de 1 ó 2 °C a lo largo de unas pocas decenas de metros).

En cuanto al viento, se puede apreciar en la figura 5 la gran incidencia de la brisa en el Aeropuerto de Son San Juan, sobre todo en verano, en que el SW alcanza una frecuencia del 35 %. No obstante, en el sector costero entre Cap Enderrocat y Cap Blanc la brisa debe soplar más bien de poniente, según el mapa de líneas de corriente de JANSÁ y JAUME (1946), debido a que su orientación general es diferente de la que ofrece la costa entre Palma y El Arenal.

Después del SW siguen en importancia W y NW, correspondientes a situaciones de flujo zonal de poniente, y NE y E, que se dan típicamente cuando se sitúa un anticiclón sobre Europa.

Los vientos fuertes pueden tener una especial importancia sobre la vegetación de los taludes costeros objeto de nuestro estudio, sobre todo los procedentes del mar, que a partir de la fuerza 7 de la escala Beaufort (equivalente a 50 Km/h) produce de forma generalizada un efecto de spray en las crestas de las olas, aumentando con ello considerablemente el contenido en sales del viento. Para obtener información sobre los vientos fuertes se ha recurrido a la estación del Centro Meteorológico de Palma, por poseer una larga serie de registros de anemocinemógrafo con datos sobre rachas máximas diarias del viento, que son los que se han utilizado para la confección de la tabla 3. En ella se da el número de días habidos durante el periodo 1961-80 en que la racha máxima del viento fué igual o superior a 50, 70, y 90 Km/h. Las rachas fuertes proceden principalmente del NW, aunque también es frecuente que provengan del SW, N, W, y NE, en orden decreciente de importancia.

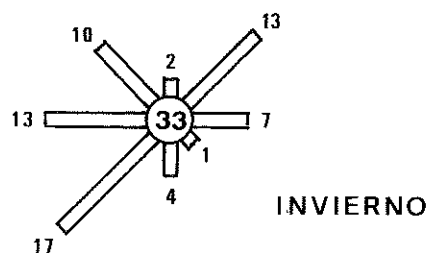
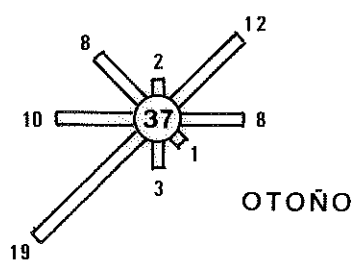
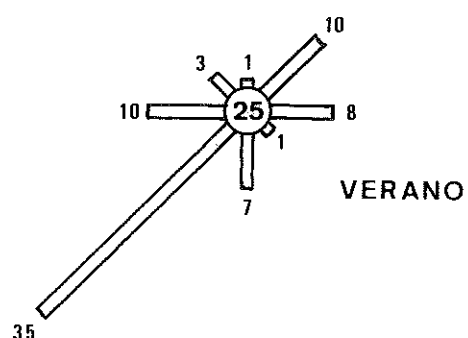
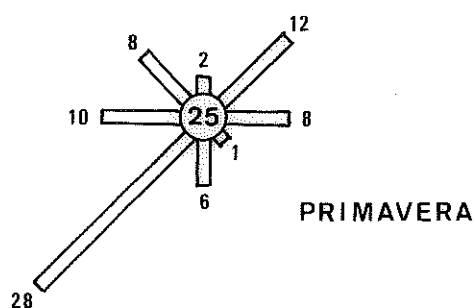


Figura 5.- Frecuencias de la dirección del viento en el Aeropuerto de Son San Juan durante el periodo 1971-80. (% sobre las observaciones de 07, 13 y 18 horas T.M.G. La cifra del centro indica el porcentaje de calmas).

Los valores de insolación relativa, muy relacionados con la nubosidad, se detallan en la tabla 4. El ciclo anual presenta un máximo muy patente en verano (julio y agosto), correspondiendo el mínimo al mes de diciembre.

La radiación solar global (directa más difusa) recibida por una superficie horizontal se mide en el Centro Meteorológico de Palma desde mayo de 1976, empleando para ello un piranómetro termoelectrónico tipo Moll-Gorczynski, de la casa Kipp&Zonen. Los valores medios mensuales de los primeros cinco años de observación se dan en la tabla 5, junto con el máximo diario registrado, la desviación típica de los valores diarios, y el coeficiente de variación. Los valores medios oscilan entre los 150 Ly/día ($1 \text{ Ly} = 1 \text{ cal.cm}^{-2}$) de diciembre y los 566 de julio. El máximo valor registrado en un día se dió en junio, con 700 Ly. Hay que señalar que los valores diarios no siguen una distribución normal, siendo la moda superior a la media. El coeficiente de variación, como el de la insolación relativa, presenta un mínimo en los meses de verano, cuando las perturbaciones atmosféricas son menos frecuentes.

En las tablas 6 y 7 se dan las medias horarias de radiación por meses: en la tabla 6 se consideran todos los días, y en la 7 sólo los días despejados.

1.2.3. Vegetación y fauna.

La vegetación general de la zona de Sa Marina de Lluçmajor se encuadra en la alianza Oleo-Ceratonion, con Cneoro-Ceratonietum como la asociación más ampliamente extendida. Abundan Olea europaea var. sylvestris, Pistacia lentiscus, Cneorum trioccon, Asparagus albus, Asparagus stipularis, Clematis cirrhosa var. cirrhosa, Arum pictum, y Cistus monspeliensis, y local-

mente Ephedra fragilis, Cistus albidus, Phillyrea angustifolia, Brachypodium phoenicoides, Sedum sediforme, y Rosmarinus officinalis. La vegetación particular de los taludes costeros se tratará en la discusión, a la vista de los inventarios realizados.

En cuanto a la fauna, sólo destacar la abundancia de conejos (herbívoros), y el establecimiento de colonias de aves marinas en los taludes más escarpados, con la consiguiente repercusión en la vegetación por el aporte de materias nitrogenadas que representa.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media	55	58	54	56	64	68	76	74	64	61	58	53
Desv. típ.	10	7	9	8	6	5	4	4	7	8	6	9
Coef. var.	18	12	17	14	9	7	5	5	11	13	10	17

Tabla 4.- Insolación relativa (%) en Palma (1961-80).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Media	167	226	366	424	505	560	566	493	389	273	204	150	360
Máxima	286	376	518	601	670	700	673	635	524	424	295	232	700
Desv. típ.	64	81	106	138	132	117	89	92	97	92	54	54	93
Coef. var.	38	36	29	33	26	21	16	19	25	34	26	36	26

Tabla 5.- Irradiación solar (Ly/día) en Palma (1975-80).

Hora	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene	-	-	-	2,9	10,8	19,5	25,3	28,1	27,1	24,0	18,1	9,3	2,1	-	-	-	
Feb	-	-	0,5	7,0	17,2	26,2	31,9	35,1	34,1	29,5	24,0	15,3	5,6	0,3	-	-	
Mar	-	0	4,9	16,1	28,7	39,2	46,7	50,5	50,9	46,5	37,4	26,5	14,2	3,7	0	-	
Abr	-	2,2	10,6	22,1	33,9	44,0	50,7	54,0	52,6	49,2	41,1	32,1	20,4	8,6	1,2	-	
May	0	4,8	15,2	28,1	40,1	49,4	56,9	60,0	61,2	57,2	47,9	39,0	26,9	14,1	4,3	0	
Jun	0,7	7,6	19,2	31,8	44,1	54,5	62,5	66,3	65,3	59,6	52,5	42,1	29,9	17,0	6,1	0,4	
Jul	0,3	6,8	18,8	32,2	44,9	55,1	63,6	67,2	66,9	61,3	53,7	43,6	30,8	17,0	5,6	0,1	
Ago	-	3,5	13,4	26,5	39,0	50,5	57,7	62,1	60,7	55,7	48,1	37,3	24,9	11,2	2,4	-	
Sep	-	0,3	6,7	18,5	31,2	42,9	49,2	53,1	51,4	47,2	39,1	28,4	15,2	5,0	0,2	-	
Oct	-	-	1,9	9,9	20,4	29,9	37,3	41,2	41,4	36,9	28,0	18,4	8,1	1,1	-	-	
Nov	-	-	-	4,6	13,6	23,1	30,6	34,0	33,6	28,4	21,0	11,5	3,2	-	-	-	
Dic	-	-	-	1,8	8,4	17,1	23,2	26,2	26,5	22,5	15,4	7,3	1,2	-	-	-	

Tabla 6.- Irradiaciones horarias medias, en cal/cm^{-2} (Palma de Mallorca, 1975-80).

Hora	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ene	-	-	-	3,2	13,8	25,2	33,4	38,1	38,1	33,7	24,4	12,2	2,1	-	-	-	
Feb	-	-	1,0	10,8	24,5	36,9	45,5	49,6	49,6	45,5	35,6	22,6	8,9	0,3	-	-	
Mar	-	0,4	6,3	19,9	34,7	47,1	55,6	60,2	60,3	54,9	45,3	32,3	17,6	4,7	0,1	-	
Abr	-	3,0	15,4	31,0	45,4	58,0	66,4	70,9	70,9	66,1	57,2	44,7	29,1	12,7	1,8	-	
May	-	6,3	20,1	36,0	50,5	62,3	71,2	75,6	75,5	70,9	61,0	48,6	33,9	18,8	5,3	-	
Jun	1,0	8,9	23,2	38,7	52,2	63,4	72,0	76,3	76,3	71,2	62,2	50,1	35,5	29,7	7,2	0,8	
Jul	0,4	7,6	21,0	35,7	49,4	61,2	69,3	74,2	73,9	69,0	60,1	48,0	33,8	18,7	5,9	0,1	
Ago	-	4,4	15,5	30,1	44,3	56,3	64,8	69,6	69,4	64,5	55,6	43,4	28,8	13,8	3,3	-	
Sep	-	0,3	8,2	22,2	36,6	49,1	57,3	62,1	62,1	56,8	47,1	34,3	19,3	6,2	0,2	-	
Oct	-	-	2,8	13,0	26,5	38,5	47,4	51,6	51,4	46,5	36,5	24,5	10,5	1,7	-	-	
Nov	-	-	-	5,4	16,7	28,6	36,9	41,5	41,5	36,7	27,7	15,8	4,4	-	-	-	
Dic	-	-	-	3,0	12,7	23,7	31,5	35,6	35,5	31,0	21,9	11,0	1,9	-	-	-	

Tabla 7.- Irradiaciones horarias medias, en dias despejados ($\text{Cal}/\text{cm}^{-2}$)
(Palma de Mallorca, 1975-80)

2. METODOS

2.1. Cálculo de la radiación solar sobre laderas

2.1.1. Antecedentes y planteamiento

Dada la importancia del estudio de la radiación solar y la imposibilidad práctica de efectuar medidas de la misma en todos los lugares deseados y durante un tiempo suficientemente largo, se han desarrollado diferentes métodos para estimarla, tanto para superficies horizontales como inclinadas. Su cálculo a partir de la constante solar y las ecuaciones de transmisión de la radiación a través de la atmósfera esteóricamente exacto, pero en la práctica se enfrenta al desconocimiento de los parámetros de turbiedad atmosférica que entran en la formulación, y la adopción para ellos de valores aproximados introduce considerables errores en los resultados (DIAZ-PABON y DE PABLO, 1976, 1978).

Otros estudios presentan resultados empíricos en forma de tablas y diagramas (KONDRATIEV, 1977), pero entonces hay que proceder a interpolaciones para estimar los valores correspondientes a nuestro problema concreto.

ACEITUNO et al. (1978) en su estudio de la radiación solar sobre laderas en Salamanca soslaya la dificultad debida al desconocimiento de las características de transmisión de la atmósfera calculando primeramente la relación entre la radiación recibida en superficies inclinadas y la que se recibe en la horizontal. De este modo, si se dispone de medidas de esta última, como sucede en nuestro caso, los valores relativos calculados se pueden convertir en absolutos.

No obstante, estos métodos no incluyen la consideración de uno de los mayores problemas que surgen al estudiar la radiación solar sobre un terreno accidentado, que es el de las sombras proyectadas por los relieves. Para resolverlo se emplean técnicas de simulación, bien sea matemática, mediante digitalización del relieve y procesamiento por ordenador, o bien analógica, mediante el empleo de maquetas a escala (GUEYMARD, 1975).

Para la estimación de la insolación de puntos concretos también ha sido muy empleada la fotografía hemisférica (EVANS y COOMBE, 1969; MADGWICK y BRUMFIELD, 1969; PROCTOR, 1980).

En nuestro caso despreciaremos el efecto de las sombras porque en la zona de los taludes sólo se darán durante breves periodos de tiempo y siempre cerca del orto o el ocaso, cuando la intensidad de la radiación solar es mínima. Para la evaluación de la radiación recibida por superficies inclinadas elaboraremos un modelo partiendo de la misma idea de irradiación relativa empleada por ACEITUNO et al. (1978):

Llamemos G a la radiación global recibida por una superficie horizontal, y G_1 a la recibida por una superficie inclinada. Teniendo en cuenta que en la radiación global podemos considerar por separado la componente que llega directamente del sol, Q , y la difundida por la atmósfera, q , tenemos:

$$\begin{cases} G = Q + q \\ G_1 = Q_1 + q_1 \end{cases}$$

Ahora introduciremos la simplificación de suponer que la radiación difusa que recibe una superficie inclinada es la misma que la que recibe la horizontal. Esto equivale a admitir que la radiación difusa es isótropa (presenta la misma intensidad en todas las direcciones), y que la parte de radiación difusa que deja de recibir una superficie inclinada por su menor expo

sición hacia el cielo se ve compensada por la que recibe reflejada de la superficie horizontal subyacente.

Así pues, si $q_1 = q$, la radiación recibida por una superficie inclinada con relación a la recibida por la horizontal es:

$$\begin{aligned} G_1 / G &= (Q_1 + q) / G = (Q_1 / G) + (q / G) = \\ &= (Q / G) \cdot (Q_1 / Q) + (q / G) \end{aligned}$$

Llamando k a la relación entre la radiación difusa y la global (q/G), Q / G valdrá $1-k$, puesto que $q/G + Q/G = 1$. Entonces tenemos:

$$G_1 / G = (1-k) Q_1 / Q + k$$

Por tanto para calcular los valores de G_1/G hemos de estimar:

- a) El cociente entre la componente directa de la radiación recibida en una superficie inclinada y la recibida por una superficie horizontal (Q_1/Q).
- b) La proporción entre la componente difusa y la radiación global recibidas por una superficie horizontal (k).

De estas estimaciones se tratará por separado en los dos apartados siguientes.

2.1.2. Estimación del cociente entre la radiación directa recibida en una superficie inclinada y la recibida en la horizontal (Q_1 / Q).

La radiación directa recibida por una superficie cualquiera se relaciona con la que recibiría una superficie normal a la dirección de propagación, Q'_n , del siguiente modo:

$$Q'_1 = Q'_n \cdot \cos Z_1$$

donde Z_i es el ángulo que forma la dirección de los rayos solares con la normal a la superficie. (Escribimos Q'_i y Q'_n para hacer notar que se trata de flujos instantáneos, mientras que Q_i y Q_n se referirían a totales recibidos en un periodo de tiempo dado).

Si la superficie es horizontal: $Q'_i = Q'_n \cdot \cos Z$, y Z es la distancia cenital del sol, que se calcula mediante la expresión:

$$\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos h$$

en la que:

φ = Latitud del lugar.

δ = Declinación del sol.

h = Angulo horario. Se considera nulo cuando el sol pasa por el meridiano del lugar, siendo negativo por la mañana y positivo por la tarde, (15° por cada hora de diferencia con el mediodía, en tiempo solar verdadero).

Cuando la superficie no es horizontal, Z_i se puede calcular a partir de la inclinación (i) y la orientación (a') de la superficie, y de la distancia cenital (Z) y azimut (A) solares:

$$\cos Z_i = \cos i \cdot \cos Z + \sin i \cdot \sin Z \cdot \cos (A - a')$$

a' se mide tomando como origen la dirección sur (reservaremos el símbolo a para designar el azimut de la superficie tomando como origen la dirección norte), y el azimut del sol se calcula mediante:

$$\cos A = (\sin \varphi \cdot \cos Z - \sin \delta) / (\cos \varphi \cdot \sin Z)$$

(SELLERS, 1965)

Entonces, la relación entre las componentes directas de la radiación valdrá:

$$\boxed{\frac{Q'_i}{Q'} = \frac{Q'_n \cdot \cos Z_i}{Q'_n \cdot \cos Z} = \frac{\cos i \cdot \cos Z + \sin i \cdot \sin Z \cdot \cos (A - a')}{\cos Z} =}$$

$$= \cos i + \sin i \cdot \operatorname{tg} Z \cdot \cos (A-a')$$

(En los casos en que el resultado sea negativo, éste ha de igualarse a cero).

Esta expresión corresponde a la relación entre los flujos de radiación directa que llegan a ambas superficies (irradiancias). Para obtener la relación entre los totales recibidos en un día, Q_i/Q , podemos calcular el valor medio de Q'_i/Q' desde el orto hasta el ocaso, ponderándolo en función de Q' , o de un valor proporcional a él que nos sirva de referencia, Q'_r , según la expresión:

$$Q_i / Q = \left(\sum_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} Q'_r \cdot Q'_i / Q' \right) / \sum_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} Q'_r$$

Para ello calcularemos el valor de Q'_i/Q' de hora en hora, y consideraremos que tanto Q'_i/Q' como Q'_r permanecen constantes a lo largo de cada intervalo horario.

Falta ahora elegir la expresión que ha de servir para estimar los valores de Q' necesarios para la ponderación. Por la primera ley de Lambert (JANSA, 1961) sabemos que:

$$Q' = Q'_n \cdot \cos Z$$

siendo Q'_n la irradiancia solar directa en la dirección de propagación de los rayos solares. Con el sol en el cénit, el valor de Q'_n se podría poner en función de la constante solar S :

$Q'_n = S \cdot t$, siendo t un coeficiente de transparencia atmosférica. Si el sol no está en el cénit, sino que forma con él un ángulo Z , el nuevo valor de Q'_n se obtendrá multiplicando la constante solar por t tantas veces como atmósferas ópticas m hayan de atravesar los rayos solares. Es decir:

$$Q'_n = S \cdot t^m$$

Y en la figura 6 se observa que, despreciando los efectos de refracción y de la curvatura terrestre:

$$m = \sec Z = 1 / \cos Z$$

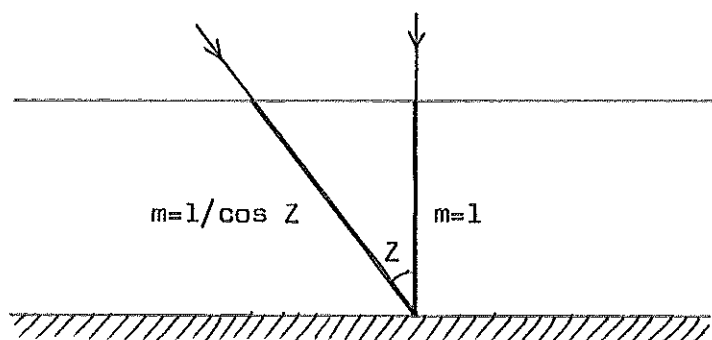


Figura 6

Para efectos de la ponderación que nos interesa podemos suprimir la constante solar por simplificación, y a t le asignaremos un valor medio de 0,7 (KONDRATYEV, 1969, 1977), por lo que el valor de referencia que emplearemos será:

$$Q'_r = 0,7^{1/\cos Z} \cdot \cos Z$$

El cálculo de Q_1/Q , a partir de las expresiones reseñadas, se realizó con ayuda de una calculadora programable CASIO, modelo FX-502 P. El diagrama de flujo del programa empleado se presenta en la figura 7. En lugar de tener que tomar la declinación solar del correspondiente anuario astronómico se ha considerado más cómodo emplear como dato de entrada el día del año d , y calcular δ en función de aquél, por medio de la expresión:

$$\delta = -23,5 \cos(\omega t) + 0,4 [1 - \cos(2\omega t)]$$

con $\omega t = 0,986 (d+9,5)$ grados sexagesimales.

Esta expresión es una modificación de la del método del coseno (ONRUBIA et al., 1976), a la que se ha añadido un término para acotar su error en el límite de 0,5°, tomando como referencia las declinaciones solares de un año par, no bisiesto (concretamente 1946). Después de obtenida δ se inicia el proceso para

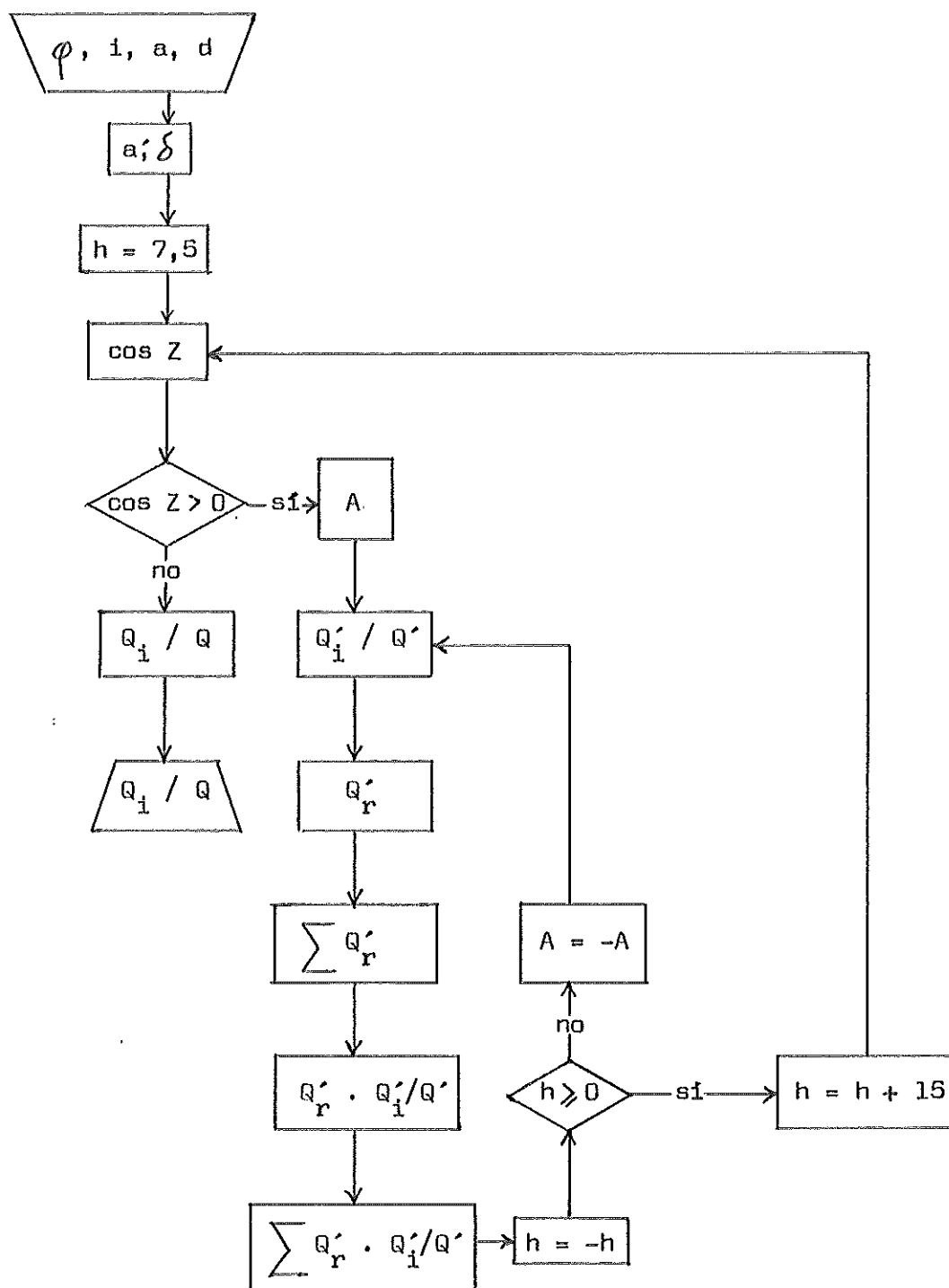


Fig. 7.- Diagrama de flujo para el cálculo de Q_1/Q .

$h = 7,5^\circ$ (valor central de la primera hora de la tarde), y se hacen dos cálculos, uno para dicha hora, y otro para su simétrica de la mañana respecto al mediodía (fig. 8). Luego se va repitiendo el proceso, sumando 15° a h cada vez, hasta que se alcanza el ocaso ($\cos Z \leq 0$).

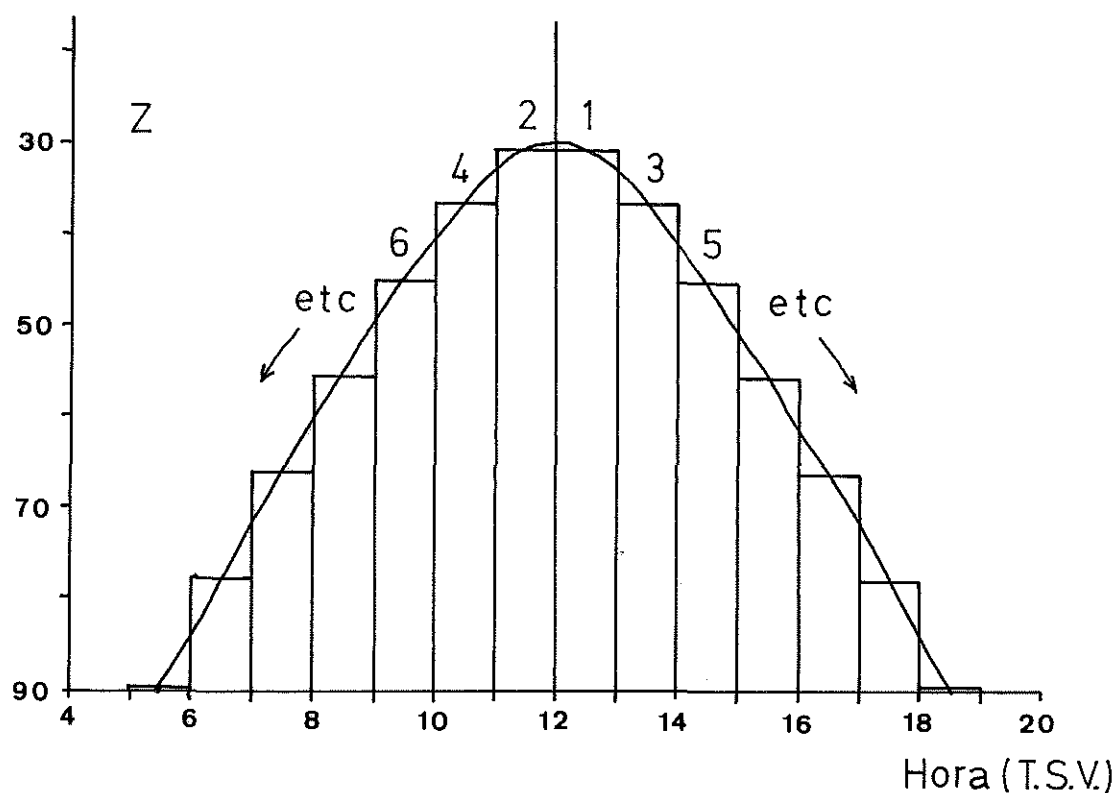


Figura 8.- Orden de cálculo de Q'_1/Q' .

2.1.3. Estimación del cociente entre las radiaciones difusa y global recibidas en una superficie horizontal (k).

No disponiendo de medidas sistemáticas de radiación solar difusa en Palma de Mallorca, la relación q/G ($\approx k$) habrá de ser estimada basándose en los resultados obtenidos por otros autores. LIU y JORDAN (1960), HOTTEL (1976), y BUGLER (1977), han elaborado modelos que nos serían de utilidad, pero precisan de datos de radiación solar en ausencia de atmósfera y otros parámetros, lo cual añade complicaciones a nuestro problema. Una relación mucho más sencilla fué la encontrada por MATEOS et al. (1978) en Salamanca: $k = 0,684 - 0,53 \cdot I_r$, donde I_r representa la insolación relativa, es decir, el cociente entre la insolación registrada y la máxima teóricamente posible. Esta relación tiene la ventaja de que la determinación de la insolación relativa se efectúa habitualmente en los observatorios climatológicos, y por tanto es de aplicación inmediata. Sin embargo, si consideramos un día cubierto de nubes, I_r vale cero y por tanto k valdría 0,684, cuando por no haber radiación directa del sol (Q) el valor obtenido debería ser:

$$k = q/G = q/(Q + q) = q/(0 + q) = 1$$

Esta discordancia es debida a que MATEOS et al. trabajaban con medias decenales, y es muy improbable que el cielo esté totalmente cubierto durante dicho periodo de tiempo. Así pues, para poder aplicar una expresión similar a datos diarios, admitiremos la linealidad de la relación $k = a - b \cdot I_r$, pero elegiremos los coeficientes considerando dos condiciones de contorno:

1ª) Cuando $I_r = 0$ (día cubierto), k ha de valer la unidad.

Luego: $1 = a - b \cdot 0$, que implica $a = 1$.

2ª) Cuando $I_r = 1$ (día despejado), k puede valer 0,1 (KON-

DRATYEV, 1977). Entonces: $0,1 = 1 - b \cdot 1$, que implica $b = 0,9$.

En realidad en días despejados k suele valer más de 0,1 , dependiendo de la turbidez atmosférica, pero al mismo tiempo I_r sólo alcanza valores superiores a 0,95 en días despejados con gran transparencia atmosférica, por lo que estas variaciones en los valores de k e I_r quedan en gran parte compensadas.

Así pues, la expresión elegida para la estimación de k es:

$$k = 1 - 0,9 \cdot I_r$$

2.1.4. Evaluación de la radiación solar recibida por una superficie inclinada.

Una vez desarrollados los métodos para la estimación de Q_i/Q y k , y calculados estos valores, se puede proceder al cálculo del cociente entre la radiación solar global recibida en los lugares de inventario y la recibida por una superficie horizontal mediante la expresión:

$$G_i/G = (1 - k) Q_i/Q + k$$

Entonces, conocidos los valores de G (tabla 5), se pueden calcular asimismo los valores de la radiación recibida en las estaciones de inventario en términos absolutos (G_i).

Dado que la parte del proceso que consume más tiempo es el cálculo de Q_i/Q , y que con la calculadora empleada en este trabajo dicho cálculo tardaba entre 1 y 1,5 minutos en ser efectuado, se optó por obtener una tabla de valores de Q_i/Q como resultado intermedio, y luego obtener los valores de G_i mediante un cálculo posterior, mucho más breve. No obstante, en el apéndice 2 se ofrece el modelo global transcrito a lenguaje BASIC, de uso común en los modernos microcomputadores, en los que el tiempo total del proceso se reduce a unos pocos segundos.

2.2. Realización de los inventarios de vegetación.

Los inventarios de vegetación se realizaron sobre una superficie aproximada de 100 m^2 . Junto al nombre de la especie se da el índice de abundancia-dominancia de BRAUN-BLANQUET (1972):

- + Presencia escasa. Cobertura muy pequeña.
- 1 Abundante, pero con cobertura pequeña.
- 2 Muy numerosa, o con una cobertura de $1/20$ a $1/4$ del área.
- 3 Cobertura entre $1/4$ y $1/2$ del área.
- 4 Cobertura entre $1/2$ y $3/4$ del área.
- 5 Cobertura mayor de $3/4$ del área.

Las estaciones de inventario se eligieron arbitrariamente en los lugares accesibles a lo largo de la zona de estudio, pero siempre teniendo en cuenta que estuvieran situadas en la parte central de las facetas que forman las sinuosidades de la costa, evitando tanto las dorsales como las vaguadas. De este modo las estaciones de inventario y sus alrededores presentaban una exposición y pendiente relativamente uniformes, datos éstos que se tomaron con la ayuda de una brújula y un clinómetro rudimentario. También se tuvo en cuenta que no existiese una excesiva perturbación antropógena debida a la cercanía de algunas urbanizaciones.

La exposición se denota en 16 direcciones de la rosa de los vientos, teniendo en cuenta la corrección del norte geográfico, y la pendiente se tomó en grados, redondeados a múltiplos de cinco, con un error máximo de 5° .

Además se anotaron los porcentajes de recubrimiento total de la vegetación y del suelo, entendiendo este último como la parte de superficie no ocupada por rocas o piedras.

2.3. Ordenación de los inventarios

Con objeto de estudiar las relaciones entre las estaciones de inventario, según sus afinidades en cuanto a la composición florística, se aplicó un programa de coordenadas principales, que como es sabido es un método de análisis multivariante que partiendo de una matriz de similaridades que da lugar a una representación de los inventarios en un espacio multidimensional, transforma los ejes de dicho espacio a un nuevo sistema de ejes ortogonales dispuestos en los sentidos de máxima variación, permitiendo una reducción de las dimensiones del espacio (SNEATH y SOKAL, 1973; CLIFFORD y STEPHENSON, 1975). Como medida de similitud se ha utilizado el complemento de la distancia de Gower (GOWER, 1966), calculada a partir de los datos de abundancia-dominancia de las especies según el índice de Braun-Blanquet, aunque asignando el valor 1 a la mera presencia (que corresponde a un + en la escala original), y aumentando en una unidad el resto de los grados del índice.

No obstante, previamente a la aplicación del método se procedió a una reducción de los datos, para garantizar una mayor homogeneidad. Esto era aconsejable dado que los inventarios se realizaron durante los meses de marzo y abril, y en esa época sucede que al ir avanzando la primavera se produce una evolución florística en la composición de los inventarios, bien sea por una auténtica sucesión de terófitos, bien porque la floración de algunas especies las hace bien patentes cuando podrían haber pasado desapercibidas en inventarios anteriores efectuados en fecha más temprana. Por ello se seleccionaron 32 especies, perennes y de inequívoca determinación, aunque 6 de ellas tuvieron que ser rechazadas por estar presentes en un sólo inventa-

rio, lo que hacía poco aconsejable su empleo (CLIFFORD y STEPHENSON, 1975).

Una vez preparada la matriz de datos, el proceso de los mismos se llevó a cabo con la ayuda del programa GOWER en el Centro de Cálculo de la Universidad de Alicante.

2.4. Análisis de correlación

Los resultados del cálculo de la radiación recibida en las estaciones de inventario se sometieron a un análisis de correlación, tanto con los resultados del análisis de coordenadas principales como con la cobertura total de la vegetación. La cobertura se correlacionó asimismo con el % de suelo, la pendiente, y la exposición.

Para cada pareja de variables, x e y , se calcularon cuatro tipos de coeficiente de correlación:

- r_1 = Sin transformación de los datos.
- r_2 = Con transformación logarítmica de los datos de y .
- r_3 = " " " " " " x .
- r_4 = " " " " " " x e y .

(SOKAL y ROHLF, 1980).

3. RESULTADOS

3.1. Simulación con el modelo para el cálculo de la radiación solar.

Una vez introducido en la calculadora el programa elaborado en 2.1.2., se procedió a efectuar unas pruebas de simulación para observar el efecto que una inclinación u orientación variable tiene sobre el cociente Q_1/Q , en diferentes épocas del año. Los resultados se reflejan en las tablas 8 y 9.

3.2. Radiación solar recibida en las estaciones de inventario.

Después del ejercicio de simulación expuesto en el apartado anterior, se procedió al cálculo de los cocientes Q_1/Q para cada una de las estaciones en que se realizaron inventarios de vegetación, obteniendo valores mensuales que, referidos al día 15 de cada mes, aparecen relacionados en la tabla 10.

Con estos valores, y conocidos también los de insolación relativa y radiación solar global (tabla 11), se efectuó el cálculo de los valores medios de radiación solar global recibida en las estaciones de inventario, que aparecen en la tabla 12.

3.3. Inventarios de vegetación realizados.

Los inventarios realizados se presentan en la tabla 13, quedando reflejada la situación de las estaciones de inventario en la figura 9.

		Inclinación (grados)								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Solsticio de verano										
N		0,96	0,90	0,81	0,69	0,55	0,40	0,23	0,11	0,06
E - W		0,98	0,94	0,88	0,81	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37
S		1,01	0,98	0,93	0,85	0,74	0,62	0,48	0,33	0,18
Equinocios										
N		0,84	0,66	0,45	0,24	0,01	0	0	0	0
E - W		0,99	0,95	0,89	0,83	0,76	0,68	0,60	0,51	0,43
S		1,13	1,22	1,28	1,30	1,27	1,21	1,12	0,99	0,82
Solsticio de invierno										
N		0,60	0,20	0	0	0	0	0	0	0
E - W		0,98	0,95	0,90	0,85	0,79	0,72	0,64	0,56	0,48
S		1,37	1,70	1,97	2,19	2,34	2,41	2,42	2,35	2,21

Tabla 8.- Valores de Q_i/Q , con inclinación variable.

($\varphi = 39,5^\circ\text{N}$)

i(°)	Orientación (grados)									
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Solsticio de verano										
30	0,81	0,81	0,82	0,84	0,87	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93
60	0,40	0,40	0,47	0,55	0,62	0,66	0,67	0,65	0,63	0,62
90	0,06	0,11	0,21	0,30	0,36	0,38	0,36	0,30	0,22	0,18
Equinocios										
30	0,45	0,48	0,57	0,69	0,82	0,96	1,08	1,18	1,25	1,28
60	0	0,06	0,21	0,40	0,59	0,77	0,93	1,07	1,17	1,21
90	0	0,01	0,08	0,21	0,35	0,50	0,62	0,71	0,79	0,82
Solsticio de invierno										
30	0	0,00	0,17	0,42	0,73	1,08	1,42	1,71	1,90	1,97
60	0	0	0,01	0,16	0,50	0,96	1,48	1,97	2,30	2,41
90	0	0	0,00	0,07	0,30	0,68	1,17	1,69	2,08	2,21

Tabla 9.- Valores de Q_i/Q , con orientación variable.

$$(\varphi = 39,5^\circ \text{N})$$

E	d		15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
	i	a	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	0	-	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128
3	30	270	90	90	89	89	89	88	88	89	89	90	90	90
4	30	203	179	152	129	109	98	93	94	103	119	141	169	188
5 (=3)	30	270	90	90	89	89	89	88	88	89	89	90	90	90
6 (=4)	30	203	179	152	129	109	98	93	94	103	119	141	169	188
7 (=2)	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128
8 (=4)	30	203	179	152	129	109	98	93	94	103	119	141	169	188
9 (=2)	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128
10	30	180	187	158	132	111	98	93	95	104	122	146	177	196
11 (=3)	30	270	90	90	89	89	89	88	88	89	89	90	90	90
12	20	203	157	139	123	110	101	98	99	105	116	131	151	163
13	20	225	143	128	116	106	100	97	98	103	111	123	137	147
14	30	293	55	64	72	79	83	85	84	81	76	68	58	52
15(=10)	30	180	187	158	132	111	98	93	95	104	122	146	177	196
16	25	293	62	70	77	83	87	89	88	85	80	73	65	59
17	35	248	126	114	104	95	90	87	88	92	100	110	122	130
18	40	293	44	54	62	70	74	76	76	72	66	57	47	41
19 (=2)	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128
20 (=2)	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128
21	30	225	158	137	119	105	96	92	93	100	112	129	150	164
22	40	203	195	161	131	106	92	85	87	98	118	147	183	206
23 (=2)	30	248	125	114	105	98	93	91	91	95	101	110	121	128

Tabla 10.- Valores mensuales de Q_1/Q en las estaciones de inventario, E. (Calculados para el día 15 de cada mes, y expresados en tantos por ciento).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
I_r (%)	54	52	58	55	60	64	73	71	61	57	61	48
G (Ly/día)	167	226	366	424	505	560	566	493	389	273	204	150

Tabla 11.- Valores de I_r y G empleados para el cálculo de G_i (Palma, 1975-80).

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año	
													m	T
1	167	226	366	424	505	560	566	493	389	273	204	150	360	131
2	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131
3	159	215	345	401	475	521	521	458	366	259	193	144	338	123
4	231	281	421	443	500	537	544	502	430	330	281	207	392	143
5 (=3)	159	215	345	401	475	521	521	458	366	259	193	144	338	123
6 (=4)	231	281	421	443	500	537	544	502	430	330	281	207	392	143
7 (=2)	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131
8 (=4)	231	281	421	443	500	537	544	502	430	330	281	207	392	143
9 (=2)	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131
10	238	287	427	447	500	537	547	506	436	337	290	212	397	145
11 (=3)	159	215	345	401	475	521	521	458	366	259	193	144	338	123
12	213	267	410	445	508	554	562	509	423	316	261	191	388	142
13	202	256	397	437	505	550	559	502	412	305	245	180	379	138
14	130	188	313	380	459	512	507	433	338	228	157	119	314	115
15(=10)	238	287	427	447	500	537	547	506	436	337	290	212	397	145
16	136	194	322	388	470	525	521	446	346	235	165	123	323	118
17	188	241	374	412	478	518	521	468	389	287	229	169	356	130
18	122	177	293	361	434	483	477	405	316	213	145	112	295	108
19 (=2)	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131
20 (=2)	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131
21	214	265	402	434	494	534	540	493	415	314	260	191	380	139
22	244	291	425	437	483	512	518	487	427	339	297	219	390	142
23 (=2)	187	241	376	420	486	531	533	477	391	287	228	168	360	131

Tabla 12.- Radiación solar global recibida en las estaciones de inventario. Valores mensuales y media anual (m) en Ly/día. Total anual (T) en Kcal/cm².

[illegible]

CAMEFITOS

<u>Ajuga iva</u> (L.) Schreb.	.	.	.	.	+	.	.	+	+	+	+	+	.	.	.	.	+	+	.	+	+
<u>Brachypodium phoenicoides</u> (L.) Roem. et Schultes	2	3	1	2	2	+	2	+	3	2	2	2	3	3	.	2	.	1	.	2	+	.	.
<u>Convolvulus altheoides</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	+	1	+	.	.	.	+	+	.	.
<u>Fagonia cretica</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<u>Frankenia hirsuta</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
<u>Helianthemum caput-felis</u> Boiss.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>Helichrysum stoechas</u> (L.) Moench	.	2	2	1	.	1	+	1	1	1	+	.	.	1	.	.	1	+	.	.	.	+	+
<u>Limonium ebusitanum</u> F.Q.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+	+	.	.	.	.
<u>Lotus cytisoides</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.

<u>Micromeria filiformis</u> (Ait.) Benth.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
<u>Oryzopsis coerulescens</u> (Desf.) Hachel	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	1	1
<u>Phagnalon rupestre</u> (L.) DC.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<u>Phagnalon saxatile</u> (L.) Cass.	.	.	1	.	1	+	2	3	2	1	+	1	1	1	2	1	.	+	+
<u>Polygala rupestris</u> Pourret	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<u>Psoralea bituminosa</u> L.	.	.	+	+	.	+	+	.	.	+	.	.	.	+	.	+	2	1	.
<u>Ruta chalepensis</u> L.	.	+	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	+	+	.	+	+	.
<u>Scabiosa cretica</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<u>Teucrium polium</u> L.	1	+	1	1	2	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	+	+	+	.

HEMICRIPTOFITOS

[illegible]

[illegible]

GEOFITOS

<u>Allium subvillosum</u> Salzm.	• + + • • • + • + + + • + + • • • 1 + + • • •
<u>Arisarum vulgare</u> Targ.-Tozz.	• • • • • • • • • • • • • + • • • • •
<u>Arum pictum</u> L.	+ 1 + • • • • • • • • + • • • + • • • • •
<u>Asphodelus microcarpus</u> Salzm. et Viv.	2 + + + + • • • + • 1 • • 1 • + • • • + • • •
<u>Gladiolus illyricus</u> Koch	• • • • • • • • • • • • • • + • • • • •
<u>Ophrys speculum</u> L.	• + • • • • • • • • • • • • + • • • • •
<u>Urginea maritima</u> (L.) Baker	+ 1 + + • + + + 1 • + + + • • + • • + • • + +

TEROFITOS

<u>Anagallis arvensis</u> L.	+ . + . . . + . + . + . + . . + . . . +
<u>Antirrhinum orontium</u> L. + . .
<u>Avena sterilis</u> L. + + + . . .
Bellis annua L.	1 .

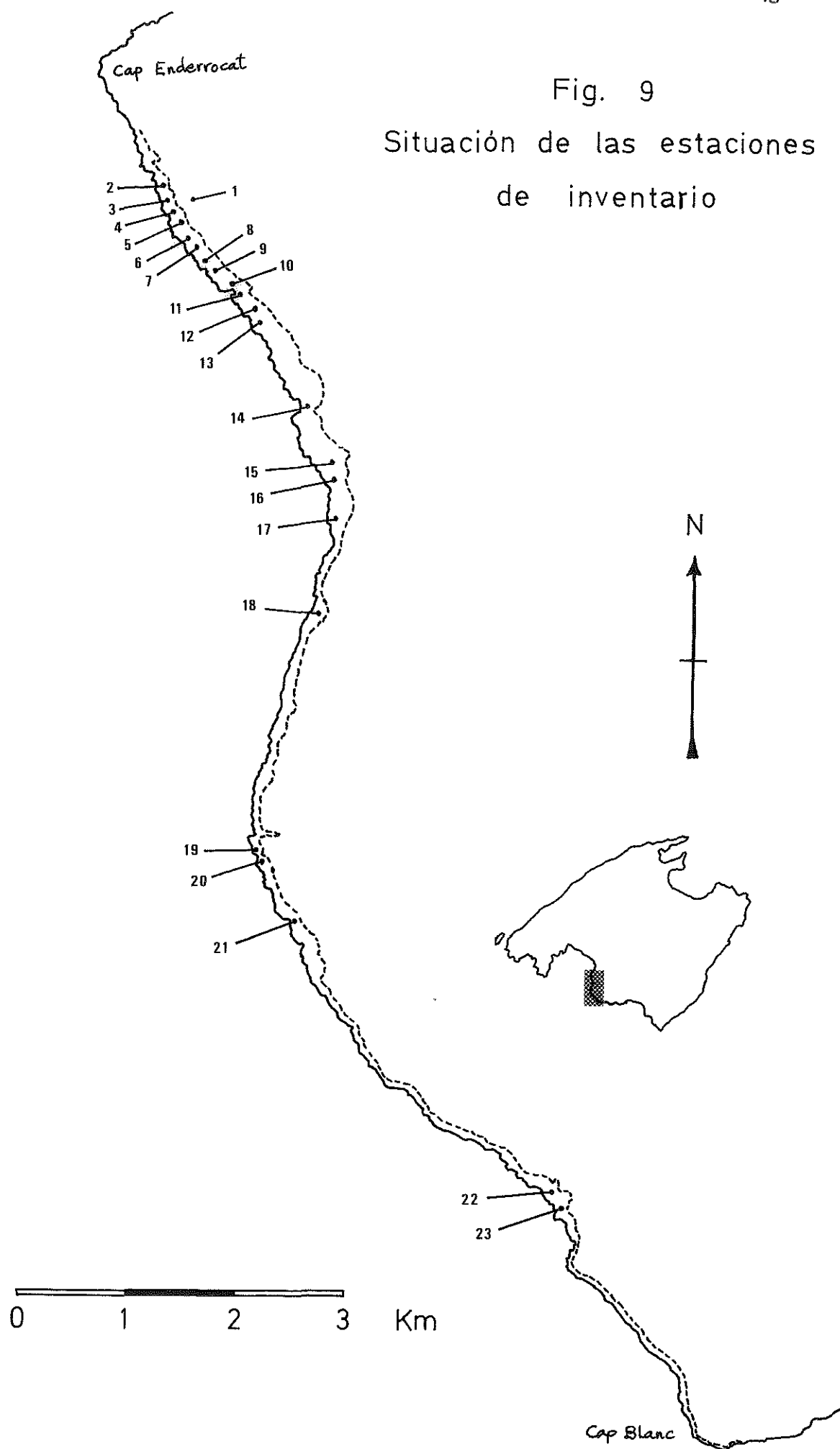
<u>Blackstonia perfoliata</u> (L.) Huds.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>Bupleurum semicompositum</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+
<u>Centaureum</u> sp.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
<u>Echium sabulicola</u> Pomel	.	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.
<u>Erodium malacoides</u> (L.) L'Hér.	.	+	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<u>Euphorbia exigua</u> L.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<u>Euphorbia peploides</u> Gouan	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	+	.	.	.	.	+	+	.
<u>Evax pygmaea</u> (L.) Brot.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>Fillago vulgaris</u> Lam.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>Geranium rotundifolium</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
<u>Hyoseris scabra</u> L.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<u>Lagurus ovatus</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<u>Linum strictum</u> L.	.	.	.	+	.	.	+	.	+	+	+	.	+	+	.	1	+	+	.	+
<u>Lotus</u> sp.	.	1	1	+	+	+	1	1	.	1	.	+	1	+	+	+	.	1	+	+
<u>Medicago</u> cf. <u>littoralis</u> Rohde ex Loisel.	+	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.	+	.	.
<u>Ononis reclinata</u> L.	+	+	+	+	+	.	+	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.
<u>Plantago afra</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

<u>Rhagadiolus stellatus</u> (L.) Gaertn.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.
<u>Silene secundiflora</u> Otth	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	+
<u>Sonchus tenerrimus</u> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	+	.	.
<u>Spergularia bocconii</u> (Scheele) Asch. et Graebn.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+	+	.	.
<u>Trifolium campestre</u> Schreb.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.
<u>Valantia muralis</u> L.	+	+	+	.	+	.	+	.	+	.	+	.	+	+	.	.	.	+	.	.	.	.

= = = = =

Tabla 13.- Inventarios de vegetación realizados.

Fig. 9
Situación de las estaciones
de inventario



3.4. Ordenación de los inventarios

Las especies que se seleccionaron para el análisis de coordenadas principales fueron las siguientes:

Pistacia lentiscus L. (Clave: Pistle)
Rosmarinus officinalis L. (Rosmof)
Olea europaea L. (Oleaeu)
Ephedra fragilis Desf. (Ephefr)
Lycium intricatum Boiss. (Lyciin)
Cistus monspeliensis L. (Cistmo)
Cneorum tricoccon L. (Cneotr)
Pinus halepensis Mill. (Pinuha)
Lavatera maritima Gouan (Lavama)
Asparagus stipularis Forsk. (Aspast)
Asparagus albus L. (Aspaal)
Salsola vermiculata L. (Salsve)
Capparis spinosa L. var. rupestris (S. et Sm.) Viv. (Cappsp)
Helichrysum stoechas (L.) Moench (Hchrst)
Phagnalon saxatile (L.) Cass. (Phagsa)
Phagnalon rupestre (L.) DC. (Phagru)
Asphodelus microcarpus Salzm. et Viv. (Asphmi)
Teucrium polium L. (Teucpo)
Urginea maritima (L.) Baker (Urgima)
Sedum sediforme (Jacq.) Pau (Seduse)
Rubia peregrina L. (Rubipe)
Polygala rupestris Pourret (Polgru)
Micromeria filiformis (Ait.) Benth. (Micrfi)
Limonium ebusitanum F.Q. (Limoeb)
Plantago albicans L. (Planal)
Spergularia bocconii (Scheele) Asch. et Graebn. (Sperbo)

Por consiguiente, la matriz de partida para efectuar el análisis multivariante es la que se expone en la tabla 14. Los resultados de dicho análisis se reseñan en las tablas 15 a 18, en las que se dan la matriz de distancias (tabla 15), las coordenadas de las estaciones en los cinco primeros ejes del análisis (tabla 16), el porcentaje de la varianza correspondiente a dichos ejes (tabla 17), y los coeficientes de correlación de los ejes con las diferentes especies empleadas en el análisis, señalando cuáles son significativos a los niveles de 0,05 y 0,01 (tabla 18). Todos los datos se han redondeado a la tercera cifra decimal.

3.5. Análisis de correlación

En la tabla 19 se dan los valores obtenidos para los coeficientes de correlación, r_1 a r_4 , entre la irradiación solar de las estaciones de inventario y las coordenadas de dichas estaciones en los ejes del análisis multivariante efectuado. El análisis de correlación se efectuó con los valores mensuales de cuatro meses del año (enero, abril, julio, y octubre), y para los valores anuales. En la tabla 20 se presentan resultados análogos, aunque ahora se refieren únicamente al eje III, que es el que da valores más altos, habiéndose ampliado el análisis a todos los meses del año.

Los resultados de otros análisis de correlación efectuados se detallan en las tablas 21 (cobertura con: % de suelo, pendiente, y exposición), 22 (% de suelo, pendiente, y exposición, con los ejes del análisis de coordenadas principales), y 23 (pendiente y exposición, con irradiación solar).

Especies		Inventarios																			
Clave	No.	1	.	.	.	6	.	.	.	11.	.	.	16.	.	.	21.	.	.	.	.	.
Pistle	1	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	3	6	0	3	0	3	4
Rosmof	2	4	4	3	4	3	4	2	3	3	4	3	0	3	2	2	3	2	3	0	0
Oleaeu	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ephefr	4	0	2	0	0	0	2	0	2	0	0	2	2	2	0	2	2	0	2	3	0
Lyciin	5	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	0	3	0	0	2	2	2	2	3	1
Cistmo	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Cneotr	7	0	0	0	1	2	1	2	0	0	0	0	1	2	2	2	2	0	1	0	0
Pinuha	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1
Lavama	9	1	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	0	4	2	2	1	2	2	2
Aspast	10	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	2	2	2	1	1	0	0	1	2
Aspaal	11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
Salsve	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2
Cappsp	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
Hohrst	14	0	3	3	2	0	2	1	2	2	2	1	0	0	2	0	0	2	1	0	0
Phagsa	15	0	0	2	0	2	1	3	4	3	2	1	2	2	2	3	2	0	1	1	0
Phagru	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Asphmi	17	3	1	1	1	1	0	0	0	1	0	2	0	0	2	0	1	0	0	0	1
Teucpo	18	2	1	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	2
Urgima	19	1	2	1	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0
Seduse	20	1	2	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
Rubipe	21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
Polgru	22	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Micrfi	23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Limoeb	24	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0
Planal	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0
Sperbo	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1

Tabla 14.- Matriz de partida para el análisis de coordenadas principales.

1	000
2	565 000
3	524 417 000
4	482 423 144 000
5	615 622 364 356 000
6	510 351 295 212 403 000
7	583 583 340 333 311 354 000
8	617 513 326 372 447 313 273 000
9	613 487 295 347 425 391 403 333 000
10	572 524 313 321 432 340 348 333 273 000
11	470 444 280 292 342 257 375 267 333 403 000
12	630 589 435 429 432 378 333 333 417 375 347 000
13	572 524 353 346 295 285 236 333 375 361 306 273 000
14	613 556 446 440 386 472 417 512 431 436 436 464 393 000
15	696 661 500 494 409 476 288 368 532 493 455 371 326 494 000
16	618 439 433 428 347 356 327 365 468 446 353 326 288 339 359 000
17	706 619 410 403 604 446 486 514 577 455 526 560 583 600 481 547 000
18	483 452 509 478 574 456 523 532 613 542 504 531 522 531 553 425 542 000
19	654 539 542 537 652 456 553 542 627 544 549 500 588 640 589 557 512 488 000
20	652 657 484 479 554 495 479 542 533 440 500 400 500 552 547 544 544 572 479 000
21	722 652 594 583 628 478 606 596 650 637 506 545 583 662 631 563 650 619 528 399 000
22	444 472 333 327 452 378 411 446 429 417 351 472 399 528 531 480 518 508 554 484 593 000
23	693 623 510 505 560 511 423 494 530 494 528 340 461 461 511 422 620 548 579 397 500 539 000

Tabla 15.- Distancias interinventarios
(Métrico de Gower, expresado en milésimas).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Estación	E J E S				
	I	II	III	IV	V
1	.207	.363	.336	-.222	.505
2	.188	.337	.194	.037	-.506
3	-.100	.244	-.254	-.024	.008
4	-.067	.253	-.201	-.011	.053
5	-.280	-.037	.121	-.075	.145
6	.005	.161	-.080	.021	-.261
7	-.243	-.133	.008	.118	.149
8	-.187	-.011	-.122	.103	-.207
9	-.205	.135	-.222	-.209	-.130
10	-.117	.066	-.267	-.027	.069
11	-.105	.135	-.013	-.153	-.139
12	-.087	-.275	.012	-.061	-.069
13	-.259	-.089	.120	-.049	-.040
14	-.138	-.069	.278	-.096	.064
15	-.177	-.283	.114	.373	.146
16	-.119	-.137	.347	.111	-.224
17	.150	.033	-.338	.567	.229
18	.288	.103	.401	.246	.057
19	.422	-.075	-.079	.271	-.129
20	.271	-.289	-.245	-.254	.210
21	.397	-.280	-.117	-.310	-.185
22	.047	.213	-.055	-.144	.241
23	.108	-.365	.063	-.214	.013

Tabla 16.- Coordenadas de las estaciones de inventario en los cinco primeros ejes del análisis de coordenadas principales.

EJES	Porcentaje de la varianza	
	Individual	Acumulado
I	12,60	12,60
II	11,76	24,36
III	8,50	32,86
IV	7,63	40,49
V	6,65	47,14

Tabla 17.- Porcentajes de la varianza de los ejes del análisis de coordenadas principales.

Especies		E J E S				
Clave	No.	I	II	III	IV	V
Pistle	1	<u>-.495</u>	.174	.274	-.300	<u>.553</u>
Rosmof	2	-.402	.083	-.201	-.183	<u>.753</u>
Oleaeu	3	.188	<u>.483</u>	-.412	-.262	-.408
Ephefr	4	.288	-.220	.252	.212	<u>-.637</u>
Lyclin	5	.300	<u>-.696</u>	-.101	.330	.057
Cistmo	6	.327	.386	<u>.500</u>	-.092	<u>.497</u>
Cneotr	7	<u>-.539</u>	-.399	<u>.535</u>	.184	.067
Pinuha	8	.323	.050	.366	.076	.212
Lavama	9	-.310	-.401	-.269	.235	-.130
Aspast	10	-.202	-.374	-.138	-.291	.042
Aspaal	11	<u>.591</u>	<u>-.532</u>	-.226	-.377	-.094
Salsve	12	.374	<u>-.478</u>	-.040	-.387	-.127
Cappsp	13	<u>.657</u>	-.312	-.226	-.009	-.101
Hchrst	14	.018	<u>.556</u>	-.381	.235	-.372
Phagsa	15	<u>-.715</u>	-.372	.043	.035	-.165
Phagru	16	<u>.454</u>	.149	.290	.269	.098
Asphmi	17	-.044	<u>.439</u>	.325	-.404	.234
Teucpo	18	<u>-.726</u>	.053	-.003	-.293	<u>.441</u>
Urgima	19	-.280	<u>.437</u>	.035	-.292	<u>-.417</u>
Seduse	20	.339	<u>.572</u>	-.106	.139	.106
Rubipe	21	.162	-.065	<u>.634</u>	.042	-.295
Polgru	22	<u>.595</u>	.392	<u>.458</u>	.179	-.039
Micrfi	23	.358	.337	<u>.534</u>	.017	.407
Limoeb	24	.174	.274	-.300	<u>.553</u>	.237
Planal	25	.083	-.201	-.183	<u>.753</u>	.243
Sperbo	26	.483	-.412	-.262	-.408	.018

Tabla 18.- Coeficientes de correlación entre las especies y los ejes del análisis multivariante. (Los subrayados continuos indican un nivel de significación de 0,01 , y los discontinuos, de 0,05).

		E J E S				
		I	II	III	IV	V
Enero	r_1	-.082	-.058	-.548	-.002	-.042
	r_2	-.071	-.074	-.499	-.006	-.036
	r_3	-.073	-.067	-.580	-.023	-.046
	r_4	-.063	-.086	-.529	-.030	-.044
Abril	r_1	-.117	-.088	-.487	-.112	-.032
	r_2	-.111	-.114	-.434	-.113	-.040
	r_3	-.117	-.087	-.496	-.119	-.032
	r_4	-.110	-.114	-.443	-.122	-.042
Julio	r_1	-.158	-.098	-.222	-.229	.023
	r_2	-.159	-.132	-.182	-.227	-.009
	r_3	-.163	-.102	-.238	-.231	.015
	r_4	-.164	-.136	-.196	-.230	-.016
Octubre	r_1	-.092	-.063	-.546	-.026	-.036
	r_2	-.081	-.081	-.497	-.031	-.033
	r_3	-.087	-.067	-.567	-.042	-.037
	r_4	-.078	-.087	-.516	-.049	-.038
Anual	r_1	-.112	-.075	-.510	-.069	-.031
	r_2	-.103	-.097	-.459	-.072	-.035
	r_3	-.110	-.076	-.522	-.081	-.031
	r_4	-.102	-.099	-.470	-.085	-.037

Tabla 19.- Coeficientes de correlación entre la irradiación global G_i de las estaciones de inventario y sus coordenadas en los ejes del análisis multivariante.

Meses	r_1	r_2	r_3	r_4
Ene	-.548	-.499	-.580	-.529
Feb	-.544	-.495	-.567	-.516
Mar	-.535	-.485	-.551	-.499
Abr	-.487	-.434	-.496	-.443
May	-.366	-.318	-.376	-.327
Jun	-.151	-.113	-.165	-.127
Jul	-.222	-.182	-.238	-.196
Ago	-.442	-.391	-.453	-.402
Sep	-.524	-.474	-.537	-.486
Oct	-.546	-.497	-.567	-.516
Nov	-.550	-.501	-.582	-.531
Dic	-.550	-.501	-.582	-.531

Anexo 1

Tabla 20.- Coeficientes de correlación entre la irradiación global (por meses) y las coordenadas del eje III del análisis multivariante.

	<u>Irradiación</u>	<u>% de suelo</u>	<u>Pendiente</u>	<u>Exposición</u>
r_1	-.335	.437	-.328	.388
r_2	-.309	.406	-.314	.361
r_3	-.335	.288	-.192	.380
r_4	-.309	.259	-.205	.356

Tabla 21.- Coeficientes de correlación entre la cobertura total y las variables que se indican.

		EJES				
		I	II	III	IV	V
% de suelo	r_1	-.038	.031	.023	-.122	.262
	r_2	-.044	.024	.001	-.164	.211
	r_3	-.105	-.032	-.164	-.172	.168
	r_4	-.109	-.045	-.157	-.210	.121
Pendiente	r_1	.054	-.089	-.314	.306	-.244
	r_2	.056	-.054	-.313	.302	-.175
	r_3	-.195	-.355	-.348	.235	-.504
	r_4	-.203	-.311	-.323	.254	-.399
Exposición	r_1	.118	.049	.464	-.018	-.055
	r_2	.104	.069	.416	-.019	-.051
	r_3	.137	.049	.432	-.037	-.066
	r_4	.121	.066	.388	-.040	-.064

Tabla 22.- Coeficientes de correlación del % de suelo, la pendiente y la exposición, con los ejes del análisis multivariante.

	Pendiente	Exposición
r_1	-.124	-.966
r_2	-.139	-.955
r_3	.006	-.949
r_4	-.003	-.935

Tabla 23.- Coeficientes de correlación de la pendiente y la exposición, con la irradiación solar.

4. DISCUSION

4.1. Del método de cálculo de la irradiación

El método de cálculo desarrollado en el apartado 2.1. puede estar sujeto a críticas, tanto por las simplificaciones introducidas para superar dificultades teóricas, como por el propio sistema de cálculo empleado. La validez y efectos de estos procedimientos van a ser pues sometidos a discusión en los siguientes subapartados.

4.1.1. Sobre la variación de la radiación difusa recibida por una superficie inclinada.

En el modelo elaborado se consideró que el valor de la radiación difusa permanecía constante, cualesquiera que fueran la inclinación y la orientación de la superficie. La inclinación de la superficie produce una disminución en la exposición a la radiación difusa procedente del cielo, al tiempo que tiene lugar un aumento en la exposición a la radiación reflejada por las superficies adyacentes. Según KONDRATYEV(1969), la relación entre la componente difusa de la radiación recibida por una superficie inclinada (q_1) y la que recibe una superficie horizontal (q) vale:

$$q_1/q = (1 + \cos i) / 2$$

siendo i el ángulo de inclinación de la superficie. Entonces, la radiación difusa perdida al inclinar una superficie será, en términos relativos:

$$\boxed{\Delta q/q = (q - q_1) / q = 1 - q_1/q = (1 - \cos i) / 2}$$

Por otra parte, la radiación difusa ganada procedente por reflexión de la superficie adyacente horizontal (q_r) vale:

$q_r = G.r.(1 - \cos i) / 2$, siendo r el albedo de la superficie reflectora, y G la radiación global total (directa más difusa) que recibe ésta (supuesta horizontal). Por tanto, expresando esta ganancia también en términos relativos:

$$q_r/q = (G.r / q) \cdot (1 - \cos i) / 2$$

En el caso más favorable, ambos efectos se compensarán, y la inclinación de la pendiente no producirá ningún efecto sobre la cantidad de radiación difusa recibida. Para que esto se cumpla, las expresiones de $\Delta q/q$ y q_r/q han de ser iguales, o lo que es lo mismo, se ha de verificar:

$$G.r/q = 1 \quad ; \quad r = q/G = k$$

Es decir, el albedo de la superficie receptora y el cociente entre la radiación difusa y la global, han de coincidir numéricamente. En la práctica los valores del albedo se sitúan frecuentemente entre 0,20 y 0,35 para matorral y terreno yermo (SELLERS, 1965), y los mismos valores son aplicables a k en días despejados o poco nublados. Cuando los valores de r y k son más dispares el aumento de la radiación difusa producido por la inclinación de la superficie vale, con relación a la recibida en la horizontal:

$$(q_r - \Delta q_1)/q = (r/k - 1) \cdot (1 - \cos i) / 2$$

Y respecto a la irradiación global:

$$\begin{aligned} (q_r - \Delta q_1)/G &= (q/G) \cdot (q_r - \Delta q_1)/q = k \cdot (r/k - 1) \cdot (1 - \cos i)/2 = \\ &= (r - k) \cdot (1 - \cos i) / 2 \end{aligned}$$

Para una inclinación de 30° y un albedo de 0,25 esto supone un error en la evaluación de la irradiación global de un -2 %

en medias mensuales invernales (con $k = 0,55$), alcanzando en días individuales nublados ($k = 1$, como caso más desfavorable) un -5% . Si tenemos en cuenta que precisamente en estos casos es cuando el valor absoluto de la irradiación global es menor (invierno, días nublados), podemos desprestigiar estos errores, que además se mantienen generalmente por debajo del 5% , límite de precisión admitido para los piranógrafos termoelectrónicos con que se mide la irradiación solar global (COULSON, 1975). De hecho, cuando realmente cobra importancia la radiación reflejada por el suelo es cuando éste está cubierto de nieve (con albedos de alrededor de $0,9$), pero este problema corresponde a climas bastante más fríos que el de nuestra zona de estudio. De cualquier modo, si se desea tener en cuenta el efecto en la formulación del modelo basta añadir la última expresión como término corrector, y tendremos:

$$G_1/G = (1 - k) Q_1/Q + k + (r - k) \cdot (1 - \cos i)/2$$

Queda por discutir el efecto de la orientación de la pendiente. La simplificación de suponer que la radiación difusa celeste es isótropa es un recurso frecuentemente utilizado para simplificar este tipo de cálculos. En realidad tal isotropía no existe, y el cielo, cuando está despejado, es más luminoso en las zonas circumsolares (KONDRATYEV, 1969), pero una formulación detallada resulta engorrosa y los resultados finales tampoco están exentos de errores, pues parámetros tan variables como el tipo y cantidad de nubosidad y su distribución en el cielo a lo largo del día alteran enormemente los resultados.

Y en cuanto al efecto de la orientación de la pendiente sobre la radiación reflejada por el suelo hay que decir que en este caso la aproximación isotrópica también es bastante acep-

table excepto en casos de suelo nevado, o sobre superficies de agua, en que la reflexión se realiza en cierta proporción de modo especular. Nuevamente nos encontramos con que el error cometido al suponer la isotropía de la radiación reflejada es mayor cuanto más cercano se halla el sol del horizonte, y es entonces cuando, por ser el valor absoluto de la radiación pequeño, el error tiene menor importancia.

4.1.2. Sobre el efecto de la ponderación de Q'_1/Q' cuando el sol está próximo al horizonte.

Como se expuso en 2.1.2., la relación entre las componentes directas de la radiación que llega a una superficie inclinada y a la horizontal, es:

$$Q'_1/Q' = \cos i + \sin i \operatorname{tg} Z \cos (A - a)$$

Cuando la distancia cenital del sol (Z) tiende a 90° , $\operatorname{tg} Z$ tiende a infinito, y esto hace que resulte conveniente considerar el efecto que puede tener un valor de Z próximo a 90° sobre el cálculo de la media ponderada de Q'_1/Q' , puesto que un valor excesivamente alto podría desvirtuar totalmente el resultado. El factor de ponderación utilizado es:

$$Q'_r = 0,7^{1/\cos Z} \cdot \cos Z$$

En la tabla 24 se han realizado algunos cálculos para una superficie con una inclinación de 30° y orientada en dirección al sol ($a = A$). En ella se observa como los elevados valores de Q'_1/Q' para Z altos son neutralizados por el factor de ponderación Q'_r , que disminuye más deprisa de lo que crece Q'_1/Q' . En la realidad Q'_r no cae a cero tan rápidamente como en este modelo, debido a que aquí suponemos una superficie terrestre plana,

y entonces el número de atmósferas ópticas que atraviesan los rayos solares tiende a infinito al tender Z a 90° . Sin embargo esta característica nos resulta beneficiosa para neutralizar los valores de Q'_1/Q' , como se ha visto, al tiempo que se aproxima más a los casos reales en que, aun en terreno llano, lo normal será que en las proximidades del horizonte el sol quede oculto por la vegetación o la orografía.

Z	Q'_1/Q'	Q'_r	$Q'_r(Q'_1/Q')$
0°	0,87	0,7	0,61
30°	1,15	0,57	0,66
60°	1,73	0,25	0,42
85°	6,58	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$
86°	8,02	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
87°	10,4	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
88°	15,2	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
89°	29,5	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$6,9 \cdot 10^{-10}$

Tabla 24.- Evolución de Q'_1/Q' y $Q'_r(Q'_1/Q')$ al variar Z .

($i = 30^\circ$; $a = A$)

4.1.3. Sobre el intervalo de integración.

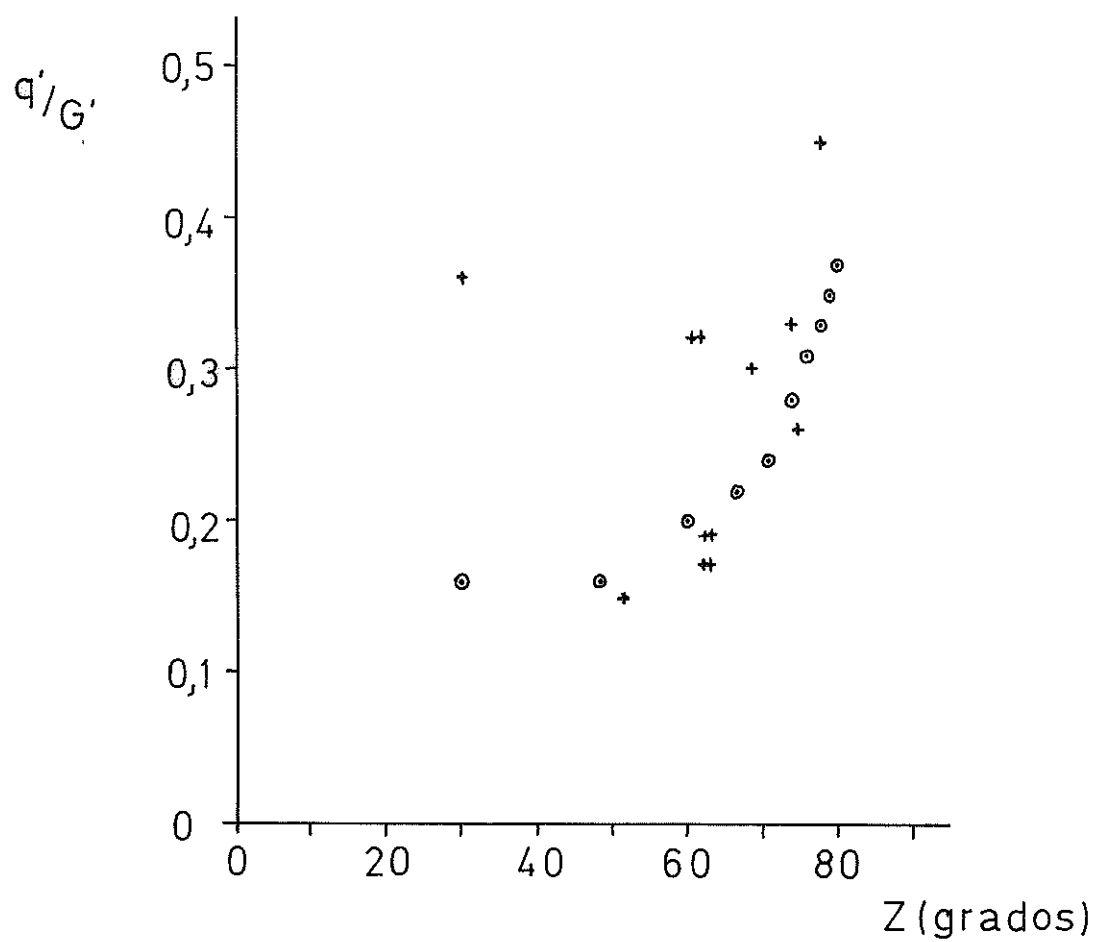
La integración necesaria para el cálculo de la media diaria ponderada de Q'_1/Q' se efectúa por diferencias finitas, y el intervalo de integración elegido es el de una hora. Un intervalo más pequeño daría como resultado una mayor exactitud, pero iría acompañado de un aumento en el tiempo de cálculo. Para comprobar si vale la pena disminuir dicho intervalo a media hora se repitieron los cálculos con este intervalo para tres de las estaciones de inventario. De la comparación de los resultados (tabla 25) se desprende que la concordancia es casi perfecta, con diferencias de un 1% en sólo 7 de los 36 cálculos efectuados, y ello debido al redondeo, por lo que el error medio puede estimarse en un 0,2 %. Siendo pues tan pequeñas las diferencias obtenidas, cabe considerar el intervalo de una hora como perfectamente aceptable.

4.1.4. Sobre la estimación de k.

La fracción de la irradiación global que corresponde a la componente difusa depende no sólo de la nubosidad, sino también de la turbiedad atmosférica y de la distancia cenital del sol. En la figura 10 se han representado los datos dados por KIMBALL (1919, citado por FRITZ, 1951) para dicha fracción, q'/G' , con cielo despejado, en función de la distancia cenital Z . Hasta $Z = 60$, q' se mantiene entre el 15 y el 20 % de G' , pero cuando el sol se aproxima más al horizonte q' aumenta considerablemente, siendo un 37 % de la irradiación global para $Z = 80^\circ$. En la misma figura se han incluido datos propios obtenidos con el piranómetro del observatorio de Palma (también en condiciones de cielo despejado), ocultando el sol mediante un

i (°) a (°) Intervalo de integración	30		40		40	
	270		203		293	
	1 h	1/2 h	1 h	1/2 h	1 h	1/2 h
Ene	0,90	0,90	1,95	1,95	0,44	0,44
Feb	0,90	0,90	1,61	1,61	0,53	0,54
Mar	0,89	0,89	1,31	1,31	0,62	0,62
Abr	0,89	0,89	1,06	1,06	0,70	0,70
May	0,88	0,89	0,92	0,92	0,74	0,74
Jun	0,88	0,88	0,85	0,85	0,77	0,76
Jul	0,88	0,88	0,87	0,87	0,76	0,76
Ago	0,89	0,89	0,98	0,98	0,72	0,72
Sep	0,89	0,89	1,19	1,18	0,66	0,66
Oct	0,90	0,90	1,47	1,47	0,58	0,57
Nov	0,90	0,90	1,83	1,83	0,47	0,47
Dic	0,90	0,90	2,07	2,06	0,42	0,41

Tabla 25.- Valores de Q_1/Q calculados con dos intervalos de integración diferentes: cada hora, y cada media hora.



⊙ Datos de KIMBALL

+ Datos propios

Figura 10.- Valores de q'/G' en función de la distancia cenital del sol, Z . (En días despejados).

disco de cartón sostenido en el extremo de una varilla, a una distancia superior a 1 m para no influir de manera apreciable en la incidencia de la luz difusa sobre el sensor. Estos valores, aunque poco numerosos, evidencian una gran dispersión en su distribución, debida sin duda a diferencias en las condiciones de turbidez atmosférica. (Los datos proporcionados por KIMBALL deben referirse a condiciones medias de turbidez). Así, en el momento de obtener algunos de los datos que presentan valores inferiores a los de KIMBALL, se daba una visibilidad horizontal de 40 y más km, que corresponde a una atmósfera muy limpia, tal como la que tiene lugar desde otoño hasta primavera tras el paso de perturbaciones frontales acompañadas de precipitaciones. En cambio en verano las lluvias son menos frecuentes y las masas de aire subtropical con régimen anticiclónico son portadoras de un mayor número de partículas en suspensión, lo que ocasiona una mayor turbidez atmosférica. Esto concuerda con el único dato de verano que se presenta, el que corresponde a $Z = 30^\circ$, que con un valor de 0,36 para q'/G' es el dato con mayor desviación respecto a los dados por KIMBALL, y no resulta un valor excesivamente alto teniendo en cuenta que GALPERIN cita valores de hasta 0,45 en días de verano (según KONDRATYEV, 1969).

No obstante, aun con ser grandes estas variaciones debidas a la turbidez, su importancia queda disminuida al entrar en consideración el factor nubosidad, que depende, en un momento dado, del tipo y espesor de las nubes, de su cantidad y distribución, y de si están o no ocultando el sol.

Pero en nuestro caso no nos interesa descender al detalle de conocer el cociente entre los flujos, q'/G' , sino que nos basta encontrar el valor correspondiente a los totales diarios, q/G (lo que hemos dado en llamar k). En este caso las relacio-

nes anteriores se han de considerar integradas a lo largo del ciclo diario, y entra como variable principal el número de horas en que el sol ha estado brillando respecto al máximo teórico posible, es decir, la insolación relativa, I_r . En la expresión elegida tras las consideraciones efectuadas en 2.1.3., I_r no sólo es la variable principal, sino la única:

$$k = 1 - 0,9 \cdot I_r$$

Para comprobar su validez tendríamos que disponer de datos totales diarios de radiación difusa en Palma, que por el momento no se obtienen. En su lugar optaremos por compararla con la expresión dada por LIU y JORDAN (1960):

$$k = 1,005 + 0,0435 k_t - 3,523 k_t^2 + 2,631 k_t^3$$

En ella, k_t es el cociente G/G_0 , siendo G_0 la radiación solar que se recibiría en ausencia de atmósfera. Los valores de G_0 se hallan tabulados en las Smithsonian Meteorological Tables, pero aquí se ha optado por calcularlos para una latitud de $39,5^\circ$ (véase apéndice 1).

La comparación de ambas fórmulas se ha realizado primeramente para medias mensuales, y los resultados se pueden observar en la tabla 26, apreciándose una concordancia bastante aceptable: la desviación media es nula, y aunque en marzo se da un error de 0,07, el error medio es únicamente de 0,03. Si consideramos ahora días individuales (tabla 27), la concordancia sigue siendo buena, con un error medio de 0,05. Estos serían los errores de la expresión empleada en el modelo si la ecuación propuesta por LIU y JORDAN diese resultados exactos, pero naturalmente no podemos esperar que ésto sea así. Mientras no se disponga en Palma de medidas diarias de radiación difusa, el único medio que tenemos para hacernos una idea de los errores de dicha ecuación es observar su comportamiento en días total-

	G	Q ₀	k _t	k(k _t)	I _r	k(I _r)	k(I _r)-k(k _t)
Ene	167	372	0,449	0,55	0,54	0,51	-0,04
Feb	226	504	0,448	0,55	0,52	0,53	-0,02
Mar	366	671	0,545	0,41	0,58	0,48	0,07
Abr	424	846	0,501	0,47	0,55	0,50	0,03
May	505	961	0,525	0,44	0,60	0,46	0,02
Jun	560	1010	0,554	0,39	0,64	0,42	0,03
Jul	566	988	0,573	0,37	0,73	0,34	-0,03
Ago	493	897	0,550	0,40	0,71	0,36	-0,04
Sep	389	743	0,524	0,44	0,61	0,45	0,01
Oct	273	566	0,482	0,50	0,57	0,49	-0,01
Nov	204	409	0,499	0,48	0,61	0,45	-0,03
Dic	150	338	0,444	0,56	0,48	0,57	0,01

$$\Sigma = 0,00$$

Tabla 26.- Comparación de $k(I_r)$ con $k(k_t)$ para medias mensuales (Palma, 1975-80).

	G	Q ₀	k _t	k(k _t)	I _r	k(I _r)	k(I _r)-k(k _t)
Ene-76	232	371	0,625	0,30	0,95	0,15	-0,15
" 77	-	"	-	-	0,35	0,69	-
" 78	93	"	0,251	0,84	0,16	0,86	0,02
" 79	109	"	0,294	0,78	0,21	0,81	0,03
Feb-76	154	507	0,304	0,77	0,27	0,76	-0,01
" 77	320	"	0,631	0,29	0,94	0,15	-0,14
" 78	284	"	0,560	0,39	0,68	0,39	0
" 79	147	"	0,290	0,79	0,21	0,81	0,02
Mar-76	382	672	0,568	0,37	0,61	0,45	0,08
" 77	436	"	0,649	0,27	0,83	0,25	-0,02
" 78	417	"	0,621	0,30	0,87	0,22	-0,08
" 79	286	"	0,426	0,59	0,44	0,60	0,01
Abr-76	332	844	0,393	0,64	0,32	0,71	0,07
" 77	367	"	0,435	0,57	0,50	0,55	-0,02
" 78	505	"	0,598	0,33	0,76	0,32	-0,01
" 79	249	"	0,295	0,78	0,01	0,99	0,21
May-76	650	961	0,676	0,24	0,86	0,23	-0,01
" 77	466	"	0,485	0,50	0,51	0,54	0,04
" 78	559	"	0,582	0,36	0,69	0,38	0,02
" 79	612	"	0,637	0,28	0,82	0,26	-0,02
Jun-76	645	1011	0,638	0,28	0,83	0,25	0,03
" 77	685	"	0,678	0,24	0,88	0,21	-0,03
" 78	630	"	0,623	0,30	0,81	0,27	-0,03
" 79	655	"	0,648	0,27	0,77	0,31	0,04

(Sigue)

Tabla 27.--(Ver página siguiente.)

(Continuación)

d	G	Q ₀	k _t	k(k _t)	I _r	k(I _r)	k(I _r)-k(k _t)
Jul-76	656	987	0,665	0,25	0,84	0,24	-0,01
" 77	294	"	0,298	0,77	0,34	0,69	-0,08
" 78	624	"	0,632	0,29	0,84	0,24	-0,05
" 79	604	"	0,612	0,32	0,77	0,31	-0,01
Ago-76	398	893	0,446	0,56	0,49	0,56	0
" 77	582	"	0,652	0,27	0,88	0,21	-0,06
" 78	366	"	0,410	0,61	0,41	0,63	0,02
" 79	501	"	0,561	0,39	0,71	0,36	-0,03
Sep-76	397	742	0,535	0,42	0,62	0,44	0,02
" 77	455	"	0,613	0,31	0,75	0,33	0,02
" 78	449	"	0,605	0,32	0,78	0,30	-0,02
" 79	461	"	0,621	0,30	0,67	0,40	0,10
Oct-76	133	568	0,234	0,86	0,13	0,88	0,02
" 77	-	"	-	-	0,29	0,74	-
" 78	315	"	0,555	0,39	0,76	0,32	-0,07
" 79	262	"	0,461	0,53	0,54	0,51	-0,02
Nov-76	156	412	0,379	0,66	0,38	0,66	0
" 77	246	"	0,597	0,34	0,94	0,15	-0,19
" 78	251	"	0,609	0,32	0,91	0,18	-0,14
" 79	203	"	0,493	0,49	0,64	0,42	-0,07
Dic-76	194	336	0,577	0,36	0,73	0,34	-0,02
" 77	189	"	0,563	0,38	0,83	0,25	-0,13
" 78	105	"	0,313	0,75	0,01	0,99	0,24
" 79	210	"	0,625	0,30	0,83	0,25	-0,05

Tabla 27.- Comparación de $k(I_r)$ con $k(k_t)$ para días individuales. (Palma, 1976-79. Días 15 de los meses indicados).

mente nublados, en los que sabemos que k vale 1. (Excepto en el caso en que las nubes sean muy translúcidas, pero es muy improbable que durante todo un día se haya dado este tipo de nubosidad sin que el heliógrafo haya registrado ni un sólo minuto de sol).

En la tabla 28 se ha calculado $k(k_t)$ para 32 de estos días, dando un error medio de 0,07, que es del mismo orden que el que dan las desviaciones respecto de la expresión elegida por nosotros, por lo que seguiremos prefiriéndola a la de LIU y JORDAN por venir dada en función de I_r , más fácil de obtener que k_t .

En el apartado 2.1.3. se dice también que la insolación relativa en días despejados nunca suele valer 1, superando valores de 0,95 sólo con ocasión de días de una gran transparencia atmosférica. Para comprobar ésto se han estudiado los valores de I_r en días despejados, eligiendo sólo aquéllos en los que la gráfica del piranógrafo era uniforme. En la tabla 29 se presenta el resultado de este estudio, realizado sobre 111 días del periodo 1975-80. La insolación relativa media presenta una oscilación anual, superando el 90 % sólo en los meses de invierno, y permaneciendo entre el 80 y el 85 % en los de verano. La media anual es de un 86 %, y los valores extremos alcanzados fueron 99 % para el máximo (en un día de diciembre) y 75 % para el mínimo (en un día de marzo). De este modo se observa cómo la insolación relativa incluye no sólo el efecto de la nubosidad, sino también el de la turbidez atmosférica. El modo en que tiene lugar esta influencia de la turbidez en la duración del registro heliográfico es sin duda por acortamiento del mismo, tanto en el orto como en el ocaso, al disminuir la radiación solar por efecto de la turbidez y quedar por debajo del umbral necesario para quemar la banda de papel en los momentos en

Fecha	G_t	Q_0	k_t	$k(k_t)$	$k(k_t) - k$
9-9-75	93	778	0,12	0,96	-0,04
11-10-75	47	588	0,08	0,99	-0,01
4-12-75	97	350	0,28	0,80	-0,20
15-12-75	72	335	0,21	0,88	-0,12
18-12-75	50	334	0,15	0,94	-0,06
19-12-75	54	333	0,16	0,93	-0,07
29-12-75	96	337	0,29	0,79	-0,21
30-12-75	68	338	0,20	0,89	-0,11
7- 2-76	72	461	0,16	0,94	-0,06
9- 2-76	41	471	0,09	0,98	-0,02
1- 5-76	110	917	0,12	0,96	-0,04
14- 5-76	190	963	0,20	0,90	-0,10
20-10-76	78	536	0,15	0,94	-0,06
23-10-76	120	519	0,23	0,86	-0,14
13-12-76	37	337	0,11	0,97	-0,03
20-12-76	51	333	0,15	0,94	-0,06
22-12-76	40	333	0,12	0,96	-0,04
23-12-76	74	333	0,22	0,87	-0,13
25-12-76	60	334	0,18	0,91	-0,09
30-12-76	27	338	0,08	0,99	-0,01
3- 1-77	42	343	0,12	0,96	-0,04
5- 1-77	87	346	0,25	0,84	-0,16
6- 1-77	42	348	0,12	0,96	-0,04
7- 1-77	51	350	0,15	0,94	-0,06
22- 2-77	98	543	0,18	0,91	-0,09
10- 3-77	131	640	0,20	0,89	-0,11
30- 4-77	50	914	0,05	1,00	0
7-10-77	41	613	0,07	0,99	-0,01
28-11-77	33	364	0,09	0,98	-0,02
5-12-77	54	348	0,16	0,94	-0,06
11-12-77	62	339	0,18	0,91	-0,09
27-12-77	36	335	0,11	0,97	-0,03

Tabla 28.- Valores de $k(k_t)$ en días totalmente nublados
(días en que $k = 1$).

que se halla próximo al horizonte.

Por último cabe considerar otra cuestión que surge de la aplicación del parámetro k : como éste se refiere a valores totales diarios, tiene el mismo valor cuando un día ha estado nublado por la mañana y despejado por la tarde que cuando ha sucedido al revés, y sin embargo la radiación recibida por una superficie orientada hacia levante o poniente será muy diferente según el caso. Esto, en días individuales, producirá un error que sólo se podría soslayar mediante modelos más detallados, que efectuasen el cálculo de G_1/G de hora en hora, por ejemplo, en lugar de hacerlo para un día medio. En nuestro caso vale la pena comprobar si la nubosidad se distribuye aleatoriamente a lo largo del ciclo diario, de modo que por término medio cualquier hora del día tenga la misma probabilidad de que el sol esté nublado que las demás. Para ello se han tomado las irradiaciones horarias medidas en el observatorio de Palma (reseñadas en 1.2.2., tablas 6 y 7), y se han calculado los cocientes entre las medias y las de días despejados (tabla 30), para cuatro meses del año. La relativa uniformidad de los valores obtenidos hacen aceptable la hipótesis de la aleatoriedad de la nubosidad con la suficiente aproximación como para no influir significativamente (por término medio) en los resultados obtenidos con el modelo de cálculo de la irradiación. (Los valores primero y último de cada día han de despreciarse, ya que al ser pequeños los valores absolutos de los datos con los que se han calculado, los cocientes están aquejados de un error relativo grande).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nº de días	4	3	8	8	7	8	24	16	9	9	6	9
media	94	90	82	89	86	83	84	86	82	86	92	91
desv. típica	2	5	5	5	4	4	4	3	5	7	2	6
máxima	97	92	93	95	91	88	90	91	92	95	94	99
mínima	93	84	75	79	82	77	76	80	77	77	90	82

Tabla 29.- Insolación relativa media y extremas (en %) en Palma, en días despejados (con una gráfica uniforme en el piranógrafo), durante el periodo 1975-80.

Hora (T.S.V.)	Enero	Abril	Julio	Octubre
4 - 5	-	-	0,75	-
5 - 6	-	0,73	0,89	-
6 - 7	-	0,69	0,90	0,68
7 - 8	0,91	0,71	0,90	0,76
8 - 9	0,78	0,75	0,91	0,77
9 - 10	0,77	0,76	0,90	0,78
10 - 11	0,76	0,76	0,92	0,79
11 - 12	0,74	0,76	0,91	0,80
12 - 13	0,71	0,74	0,91	0,81
13 - 14	0,71	0,74	0,89	0,79
14 - 15	0,74	0,72	0,89	0,77
15 - 16	0,76	0,72	0,91	0,75
16 - 17	1,00	0,70	0,91	0,77
17 - 18	-	0,68	0,91	0,65
18 - 19	-	0,67	0,95	-
19 - 20	-	-	1,00	-

Tabla 30.- Relación entre las irradiaciones horarias medias y las de los días despejados.

4.1.5. Sobre el comportamiento global del modelo.

Para contrastar la validez del método de cálculo de irradiaciones desarrollado aquí, se han comparado sus resultados con datos observados tomados de KONDRATYEV (1977). Primeramente se ha efectuado la comparación con las medidas obtenidas en Karadag ($\varphi = 45^\circ$) en un día despejado (20-Jun-56), para diferentes orientaciones e inclinaciones de la superficie receptora. (Para los cálculos se ha tomado $I_r = 0,9$). Los resultados de esta comparación (tabla 31) son altamente satisfactorios, con errores máximos de un 3% (respecto de la radiación global recibida por una superficie horizontal), y de un 1,5 % como media.

Para días nublados la comparación se llevó a cabo para una inclinación de 30° , con datos de Ignalina ($\varphi = 55^\circ$). Como era de esperar, los errores son en este caso considerablemente superiores (tabla 32), debido a la no uniformidad de la distribución de la nubosidad a lo largo de días individuales. No obstante estos errores son inferiores al 20 % en un 91 % de las ocasiones, e inferiores al 10 % en un 44 % de los casos. Aunque no hemos encontrado datos experimentales referidos a medias mensuales, cabe suponer que la magnitud del error disminuirá apreciablemente para dichos periodos de tiempo.

	i ($^{\circ}$)	Calculado	Observado	Desviación
Norte	10	0,96	0,96	0
	20	0,89	0,88	0,01
	30	0,81	0,79	0,02
	50	0,59	0,57	0,02
	70	0,32	0,29	0,03
	90	0,24	0,21	0,03
Este	10	0,98	0,98	0
	20	0,95	0,93	0,02
	30	0,90	0,88	0,02
	50	0,79	0,77	0,02
	70	0,65	0,64	0,01
	90	0,51	0,49	0,02
Sur	10	1,02	1,04	-0,02
	20	1,01	1,01	0
	30	0,98	0,99	-0,01
	50	0,86	0,88	-0,03
	70	0,64	0,66	-0,02
	90	0,40	0,41	-0,01

Tabla 31.- Comparación de los valores calculados de G_1/G , con los observados en Karadag ($\varphi = 45^{\circ}$) en un día despejado (20-Jun-56). ($d = 171$).

Fecha d	I_r	Norte			Este			Sur		
		Cal.	Obs.	Desv.	Cal.	Obs.	Desv.	Cal.	Obs.	Desv.
28-3	87 0,85	0,42	0,44	-0,02	0,93	1,00	-0,07	1,37	1,41	-0,04
29-3	88 0	1,00	0,81	0,19	1,00	0,90	0,10	1,00	0,96	0,04
31-3	90 0,55	0,64	0,57	0,07	0,96	1,32	-0,36	1,23	1,42	-0,19
1-4	91 0,85	0,46	0,53	-0,07	0,93	0,99	-0,06	1,34	1,53	-0,19
3-4	93 0,75	0,53	0,64	-0,11	0,94	0,81	0,13	1,28	1,45	-0,17
4-4	94 0,50	0,69	0,58	0,11	0,96	1,00	-0,04	1,18	1,37	-0,19
5-4	95 0,21	0,87	0,78	0,09	0,98	0,87	0,11	1,08	1,15	-0,07
6-4	96 0,23	0,86	0,56	0,30	0,98	0,85	0,13	1,08	1,35	-0,27
7-4	97 0,50	0,71	0,61	0,10	0,96	1,02	-0,06	1,17	1,36	-0,19
10-4	100 0,80	0,55	0,56	-0,01	0,94	1,04	-0,10	1,25	1,39	-0,14
11-4	101 0,87	0,52	0,46	0,06	0,93	0,98	-0,05	1,27	1,43	-0,16
12-4	102 1,00	0,46	0,54	-0,08	0,92	1,03	-0,11	1,31	1,35	-0,04

Tabla 32.-Comparación de los valores calculados de G_1/G , con los observados en Ignalina ($\varphi = 55^\circ$) en días nublados, para una pendiente de 30° .

4.2. De la simulación.

4.2.1. Sobre el efecto de la inclinación y orientación de la pendiente en la radiación solar recibida.

Con los datos de la simulación efectuada en 3.1. se han confeccionado las figuras 11 a 14, que representan la variación del cociente entre las componentes directas de la radiación diaria recibida en una superficie inclinada y en una horizontal, Q_1/Q , al variar la inclinación y orientación de la pendiente. De la observación de las figuras 11 y 12 se desprende que las pendientes orientadas a levante y poniente reciben una cantidad de radiación solar siempre inferior a la que se recibe en una superficie horizontal, dependiendo esta relación más de la inclinación de la superficie que de la época del año, que apenas tiene importancia para estas orientaciones.

Las pendientes orientadas al sur se ven muy favorecidas en invierno, llegando a recibir casi dos veces y media la radiación que llega a la horizontal para inclinaciones de más de 45°. En la época de los equinoccios esta diferencia de irradiación se atenúa considerablemente, y en verano se invierte la relación, pasando la pendiente al sur a ser deficitaria respecto a la horizontal, excepto para inclinaciones inferiores a 20°.

Las pendientes con orientación norte siempre reciben menos radiación que la horizontal, siendo la diferencia mínima en verano, y haciéndose progresivamente mayor al acercarse el solsticio de invierno. Para pendientes fuertes con esta orientación, la radiación directa se hace nula.

La orientación de la pendiente (figuras 13 y 14) tiene poca importancia en verano, sobre todo para pendientes ligeras o mo-

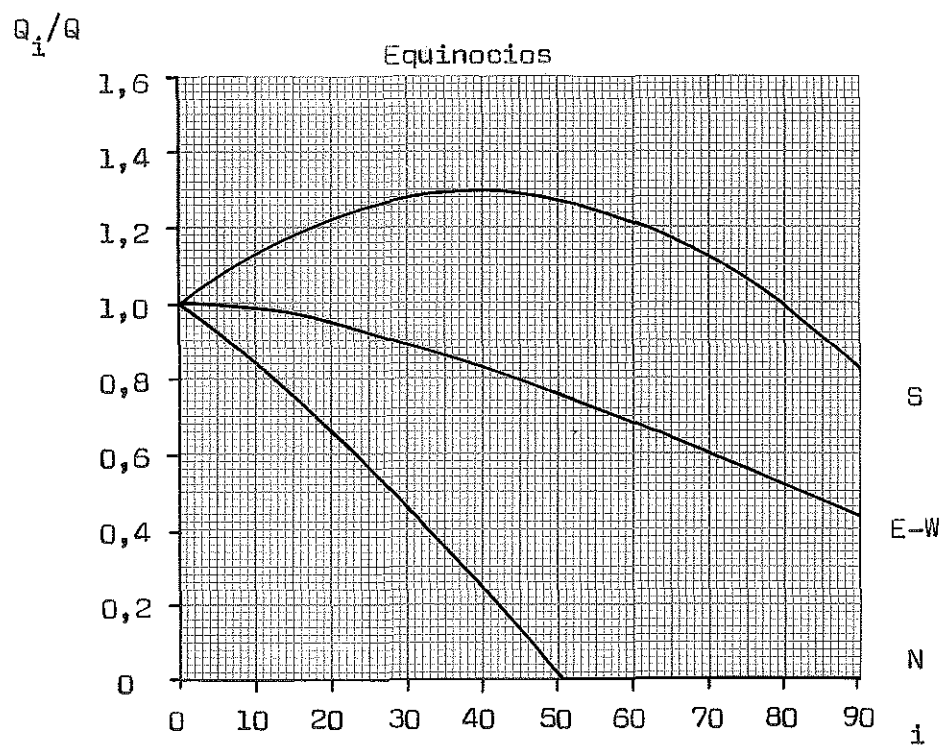
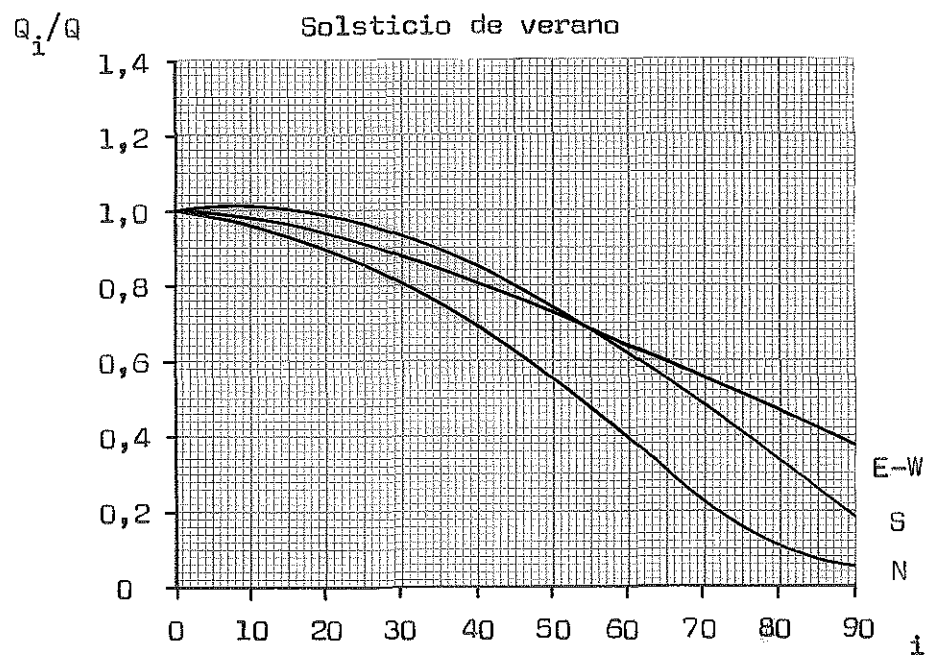


Figura 11.- Variación del cociente Q_i/Q en función de la inclinación de la superficie. (Solsticio de verano y equinocios).

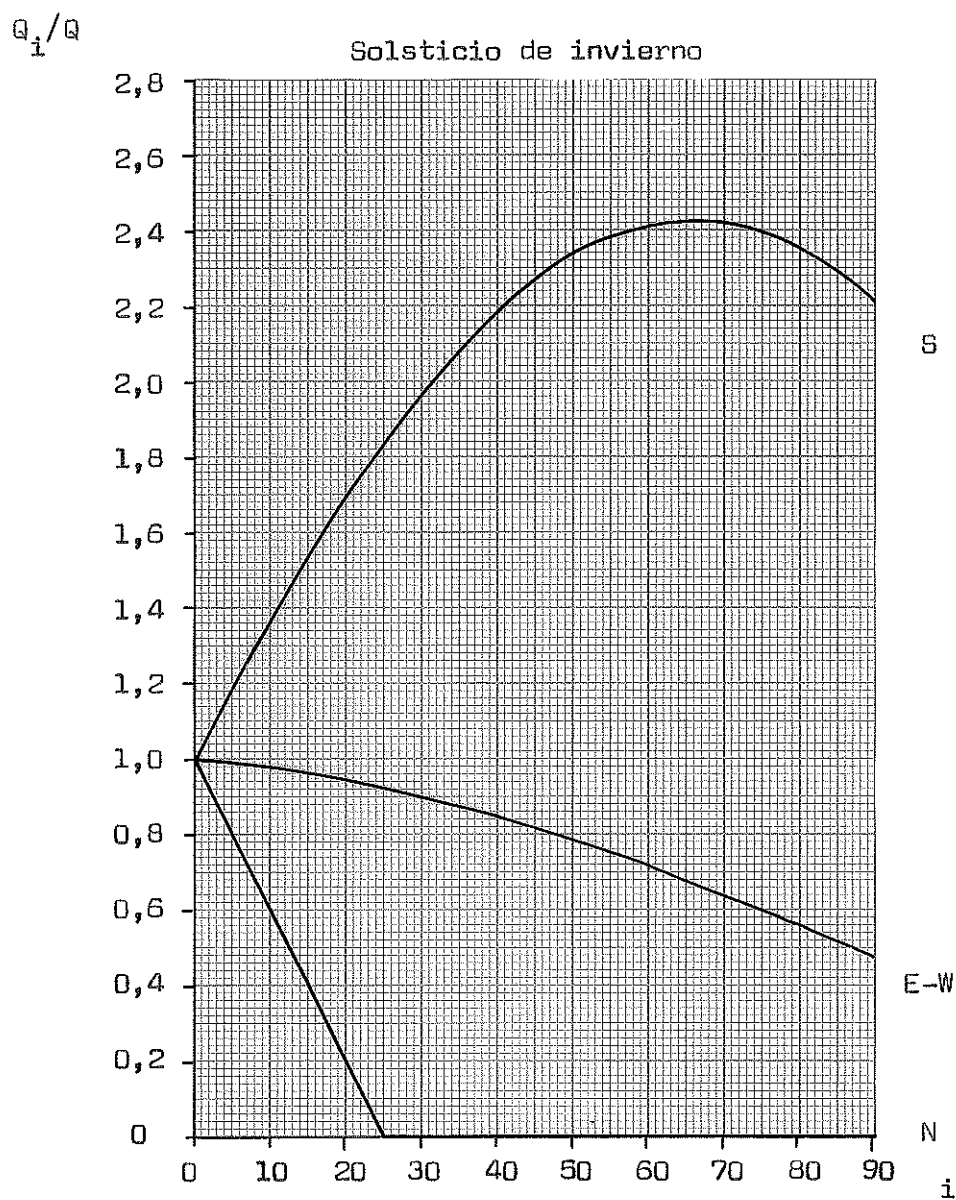


Figura 12.- Variación del cociente Q_i/Q en función de la inclinación de la superficie. (Solsticio de invierno).

deradas, pero va creciendo hacia el solsticio de invierno, en que se hace máxima.

Estas observaciones son válidas para latitudes no muy diferentes a la nuestra, y se refieren a la componente directa de la irradiación. Al considerar los valores globales de la irradiación (directa más difusa), hay que tener en cuenta que estas diferencias serán inferiores, amortiguándose tanto más cuanto mayor sea la importancia de la irradiación difusa respecto a la global. Así, en días despejados estas diferencias serán aproximadamente un 20 % inferiores a las de Q_d/Q , y se anularán para días totalmente cubiertos.

4.2.2. Sobre los errores inducidos por imprecisión en las medidas de la inclinación y orientación de la pendiente.

Las figuras 11 a 14 nos permiten asimismo efectuar una proyección de los errores máximos esperables debidos a imprecisión en la medida de la inclinación u orientación de la pendiente. Para ello se han elegido unos valores típicos de radiación global e insolación relativa en un día despejado correspondiente a los equinoccios y a ambos solsticios, y se han tomado intervalos de 10 grados, tanto de inclinación como de orientación, en las zonas en que las curvas presentan máxima pendiente. Calculados los correspondientes valores de la irradiación, se ha determinado el error relativo en cada caso (tablas 33 y 34). Los errores más fuertes se dan por imprecisión en la medida de la inclinación, sobre todo en las pendientes orientadas al norte, y son máximos en invierno, cuando un sólo grado de error en la medida de i puede producir errores de hasta un 9 %. Con los valores calculados los errores medios se pueden estimar en un 3 ó 4 % por grado de error en i , lo que indica la conveniencia

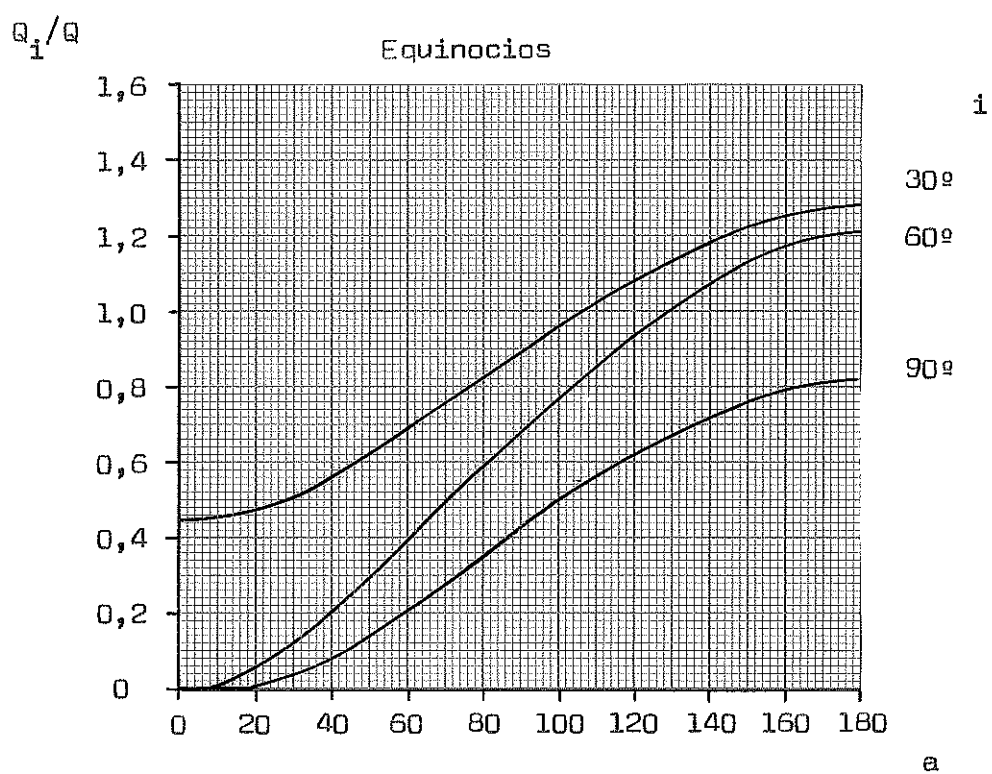
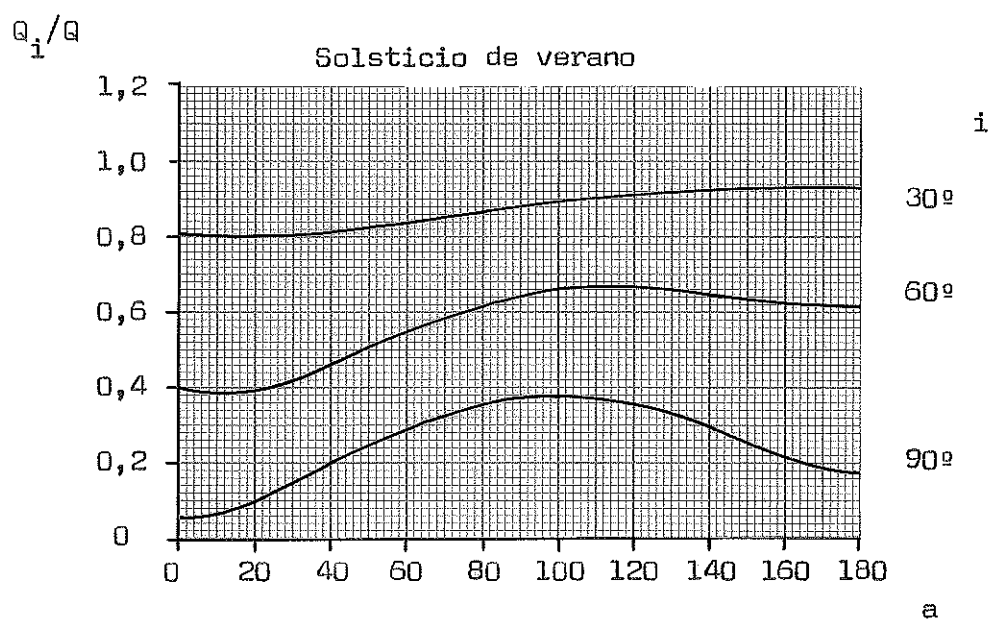


Figura 13.- Variación del cociente Q_i/Q en función de la orientación de la superficie. (Solsticio de verano y equinocios).

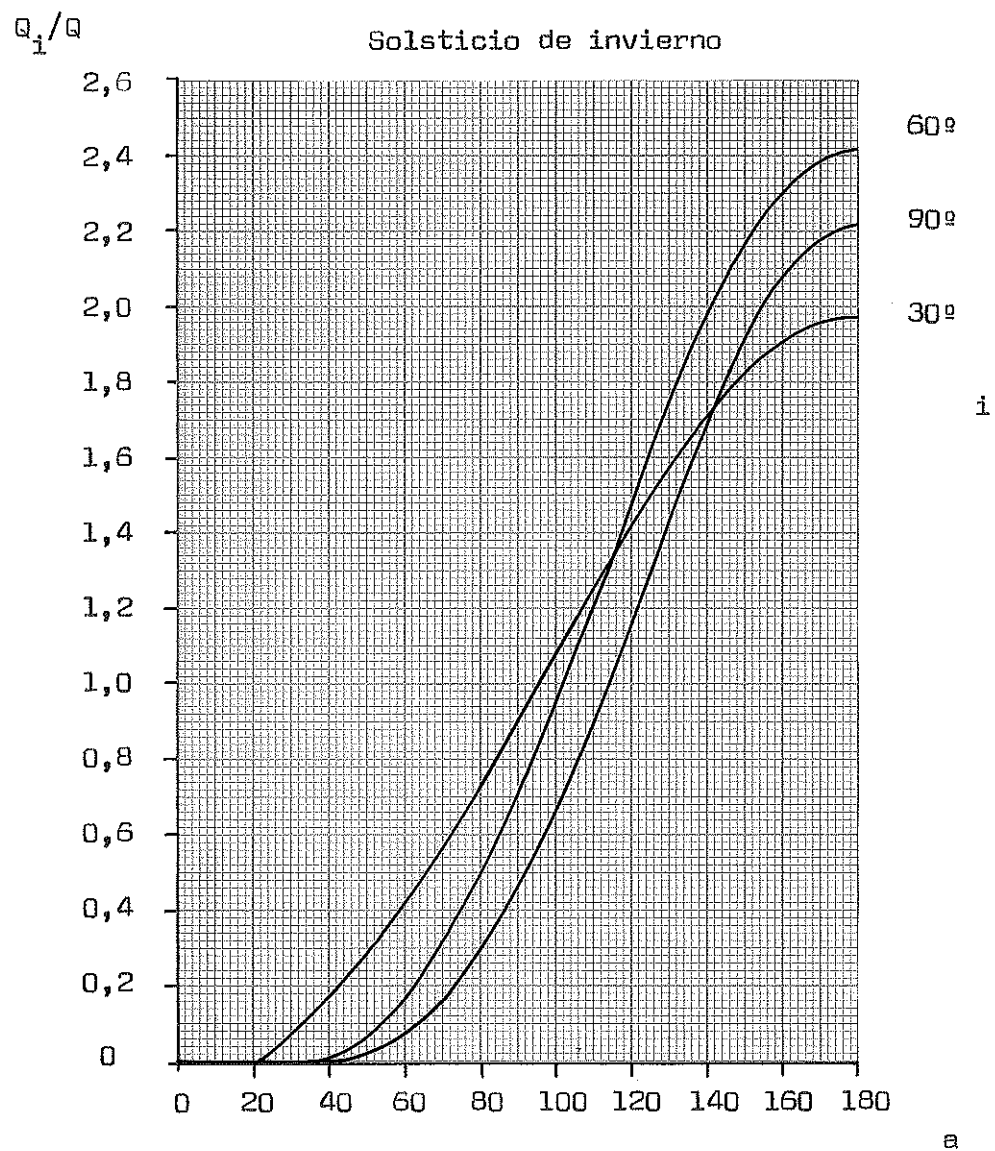


Figura 14.- Variación del cociente Q_i/Q en función de la orientación de la superficie. (Solsticio de invierno).

	$i(^{\circ})$	$a(^{\circ})$	$G_1(\text{Ly})$	Difv.	$\epsilon_r(\%)$
Solsticio de verano. ($G = 700 \text{ Ly}$)	60	0	360	97	31
	70	"	263		
	60	180	485	80	18
	70	"	405		
	40	0	211	102	64
	50	"	109		
Equinocios ($G = 550 \text{ Ly}$)	20	180	648	-27	4
	30	"	675		
	15	0	118	74	91
	25	"	44		
Solsticio de invierno. ($G = 230 \text{ Ly}$)	30	180	411	-41	10
	40	"	452		

Tabla 33.- Errores inducidos por la inclinación de la pendiente, en días despejados típicos ($I_r = 0,9$).

de emplear un buen clinómetro para la determinación de las pendientes en los trabajos de campo, evitando en lo posible toda estimación subjetiva de las mismas. Para trabajar con marcas de clase resulta deseable una subdivisión de la pendiente en clases de 5 grados como máximo.

Los errores inducidos por la orientación también son máximos en invierno, pero muy inferiores a los debidos a la inclinación, pues alcanzan como máximo un 2,4 % por grado de error en α , en las proximidades de las orientaciones E y W. Los errores medios se pueden estimar en un 1 % por grado, por lo que no resulta aconsejable trabajar con clases de tamaño superior a 10 grados. En el campo resulta indispensable el uso de una brújula, y si se desea emplear las direcciones de la rosa de los vientos, debe poder discernirse entre las 32 direcciones de la misma.

Para completar estas consideraciones se han calculado también los errores a que da lugar una imprecisión en la latitud (tabla 35). Estos errores, del orden del 2 al 3 % por grado, nos indican hasta qué punto los cálculos efectuados para un lugar determinado son aplicables a otros próximos a él, aunque desplazados en el sentido de los meridianos. Así, las figuras 11 a 14, calculadas para $\varphi = 39,5^\circ$, pueden considerarse válidas para la zona comprendida entre los $38,5$ y $40,5^\circ \text{N}$, que comprenden a la totalidad de las Baleares.

	$i(^{\circ})$	$a(^{\circ})$	$G_i(\text{Ly})$	Dif.	$\mathcal{E}_r(\%)$
Solsticio de verano. ($G = 700 \text{ Ly}$)	30	60	609	-9	1
	"	70	618		
	60	50	422	-23	5
	"	60	445		
Equinocios ($G = 550 \text{ Ly}$)	30	70	443	-27	6
	"	80	470		
	60	70	323	-44	13
	"	80	367		
Solsticio de invierno. ($G = 230 \text{ Ly}$)	30	90	211	-34	15
	"	100	245		
	60	90	176	-47	24
	"	100	223		

Tabla 34.- Errores inducidos por la orientación de la pendiente, en días despejados típicos ($I_r = 0,9$).

	$\varphi(^{\circ})$	$i(^{\circ})$	$a(^{\circ})$	$G_i(\text{Ly})$	Dif.	$\mathcal{E}_r(\%)$
Solsticio de invierno ($G = 230 \text{ Ly}$)	34,5	60	180	429	-155	31
	44,5	"	"	584		
	34,5	30	180	373	-90	22
	44,5	"	"	463		
Equinocios ($G = 550 \text{ Ly}$)	34,5	30	0	336	67	22
	44,5	"	"	269		

Tabla 35.- Errores inducidos por la latitud (o la declinación solar), en días despejados típicos ($I_r = 0,9$).

4.3. De los resultados de la aplicación a las estaciones de inventario.

En la tabla 12 se relacionaron los valores mensuales y anuales de radiación solar global para las distintas estaciones de inventario. Los valores anuales máximos, 145 Kcal/cm^2 , se dan en las estaciones 10 y 15 (30° de pendiente hacia el S), y el valor mínimo, 108 Kcal/cm^2 , en la estación 18 (40° al WNW). Los valores mensuales de estas estaciones extremas en cuanto a radiación recibida se han representado en la figura 15, junto con los valores de la estación 1, que es una estación horizontal y recibe 131 Kcal/cm^2 al año. En esta figura se observa que la estación 18 es la que menos radiación recibe durante todo el año, mientras que las que reciben una mayor radiación anual se ven superadas en verano por la horizontal. No obstante, de la inspección de la tabla 12 se desprende que el máximo invernal no corresponde a ninguna de estas estaciones, sino que es detentado por la estación 22, que con una orientación SSW, muy parecida a la S de las estaciones 10 y 15, posee sin embargo una mayor inclinación (40° , en lugar de 30°).

4.4. De los inventarios de vegetación realizados, y su ordenación.

Las especies más abundantemente representadas en los inventarios realizados son Pistacia lentiscus, Rosmarinus officinalis, Brachypodium phoenicoides, Lavatera maritima, Phagnalon saxatile, Teucrium polium, y Helichrysum stoechas. Son especies comunes en el Oleo-Ceratonion de la zona, con excepción de Lavatera maritima, que ve reforzada su presencia por la proximidad del mar y el mayor contenido de sustancias nitrogenadas del suelo (por la presencia de aves marinas), y Helichrysum stoechas, fa-

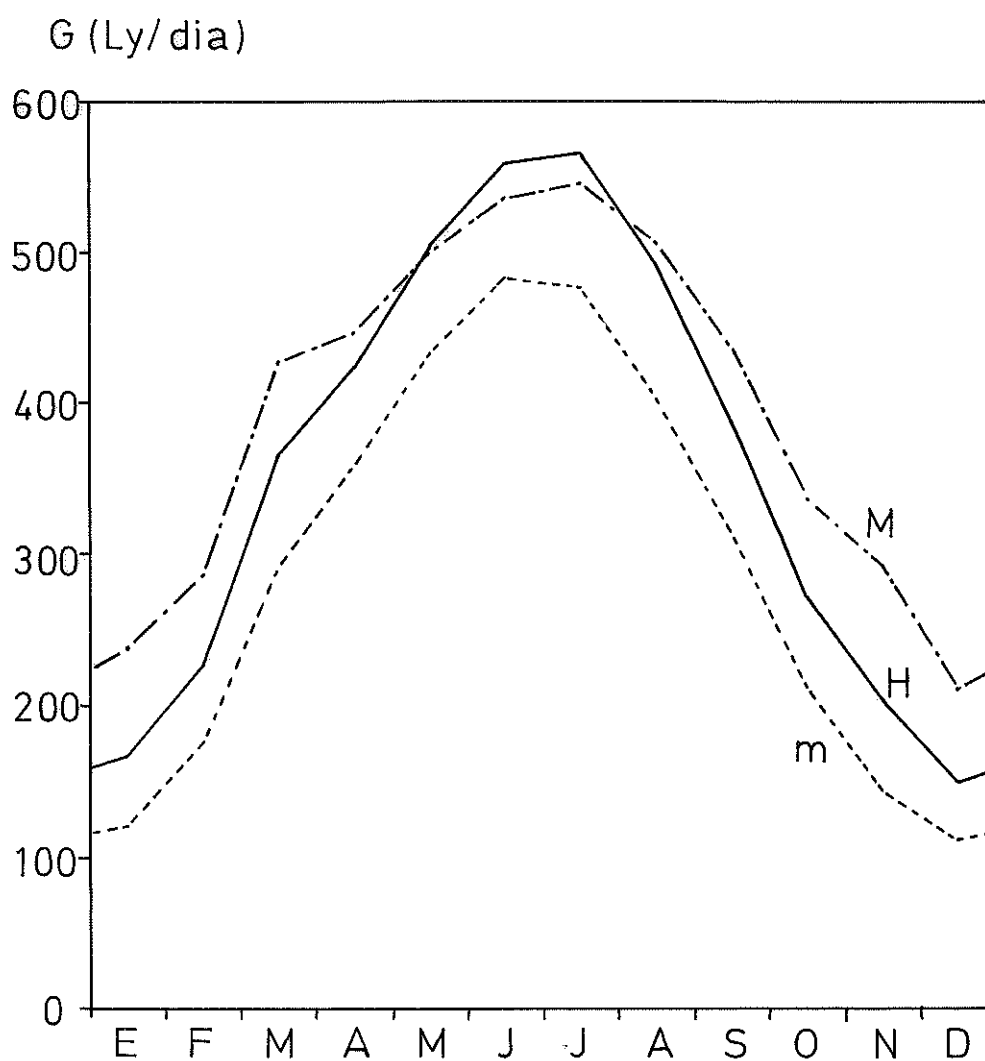


Figura 15.- Evolución anual de la radiación media recibida en las estaciones de inventario horizontal (H), y con irradiación anual máxima (M) y mínima (m). (Estaciones números 1, 10 y 15, y 18, respectivamente).

vorecido aquí por el carácter arenoso del sustrato. Olea europaea en cambio, aunque típica de la zona, sólo aparece en dos inventarios, poniéndose de manifiesto su intolerancia a ambientes excesivamente salinos. También cae drásticamente respecto a la vegetación normal de la zona la representación de Cistus monspeliensis.

Otras especies abundantes de especial significación son Ephedra fragilis, Lycium intricatum, Cneorum tricocon, y Asparagus stipularis, bien adaptadas a ambientes xerotérmicos. A la misma categoría, aunque con una abundancia menor, hay que adscribir a Asparagus albus, Salsola vermiculata, Capparis spinosa var. rupestris y, presentes sólo en un inventario cada una, Helianthemum caput-felis y Fagonia cretica, estas últimas con escasa área de distribución en Mallorca.

Mención especial merece el inventario nº 18, que con especies como Scabiosa cretica, Asparagus acutifolius, Lonicera implexa, y Prasium majus, denota un ambiente bastante más húmedo y fresco que los demás.

La presencia en el suelo de sustancias nitrogenadas es indicada, además de por la abundancia de Lavatera maritima, por otras especies nitrófilas como Lycium intricatum, Ajuga iva, Ruta chalepensis, Anagallis arvensis, Psoralea bituminosa, Spergularia bocconii, y otras especies de comunidades pratenses, que denotan un importante grado de ruderalización.

El sustrato está constituido por una mezcla de proporción variable de suelo arenoso y rocas y piedras de diversos tamaños. Donde predomina el roquedo se asientan Poligala rupestris, Micromeria filiformis, Scabiosa cretica, Helianthemum caput-felis, Prasium majus, Capparis spinosa, Sedum sediforme, y Phagnalon saxatile. En el suelo arenoso en cambio, la movilidad del sus-

trato actúa como limitante para muchas especies, estableciéndose entonces Helichrysum stoechas, Aetheorhiza bulbosa, Lotus cytisoides, Medicago litoralis, y Lagurus ovatus, principalmente.

Existen pues, dentro de la homogeneidad ambiental de la zona en su conjunto, variaciones tanto en las características del suelo como en las microclimáticas, y particularmente las relacionadas con la irradiación, objeto de este trabajo. Pero las variaciones se producen de modo gradual, sin que se puedan establecer a priori dos o más grupos de estaciones de inventario con características semejantes entre sí y diferentes de las de las demás. Esta gradación de variaciones ambientales sin saltos bruscos queda reflejada en los resultados del análisis de coordenadas principales. En la figura 16 se han representado las estaciones de inventario en un plano organizado según los ejes I y II del análisis, pero junto a cada una de ellas figuran tres números más, que corresponden a sus coordenadas en los ejes III, IV y V, expresadas en centésimas. Se puede apreciar así lo dispersa que resulta la nube de puntos en el espacio de cinco dimensiones, pues si bien dos estaciones pueden aparecer muy próximas representadas según los ejes I y II (como sucede con las estaciones 1 y 2, en la parte superior derecha de la figura), de la inspección de sus coordenadas en los otros ejes se desprende que dicha proximidad es ficticia, efecto sólo de la proyección del hiperespacio sobre un plano. (Respecto a las estaciones 1 y 2, se observa que están bastante alejadas en la dirección del eje IV, y sobre todo en la del eje V, en que ocupan posiciones extremas, diametralmente opuestas).

Los únicos grupos con proximidad apreciable entre sus elementos son las parejas formadas por las estaciones 3-4 y 5-13, y en menor medida las 9-11 y 20-21, que no son sino excepciones a la regla de una distribución dispersa de los puntos, corrobó

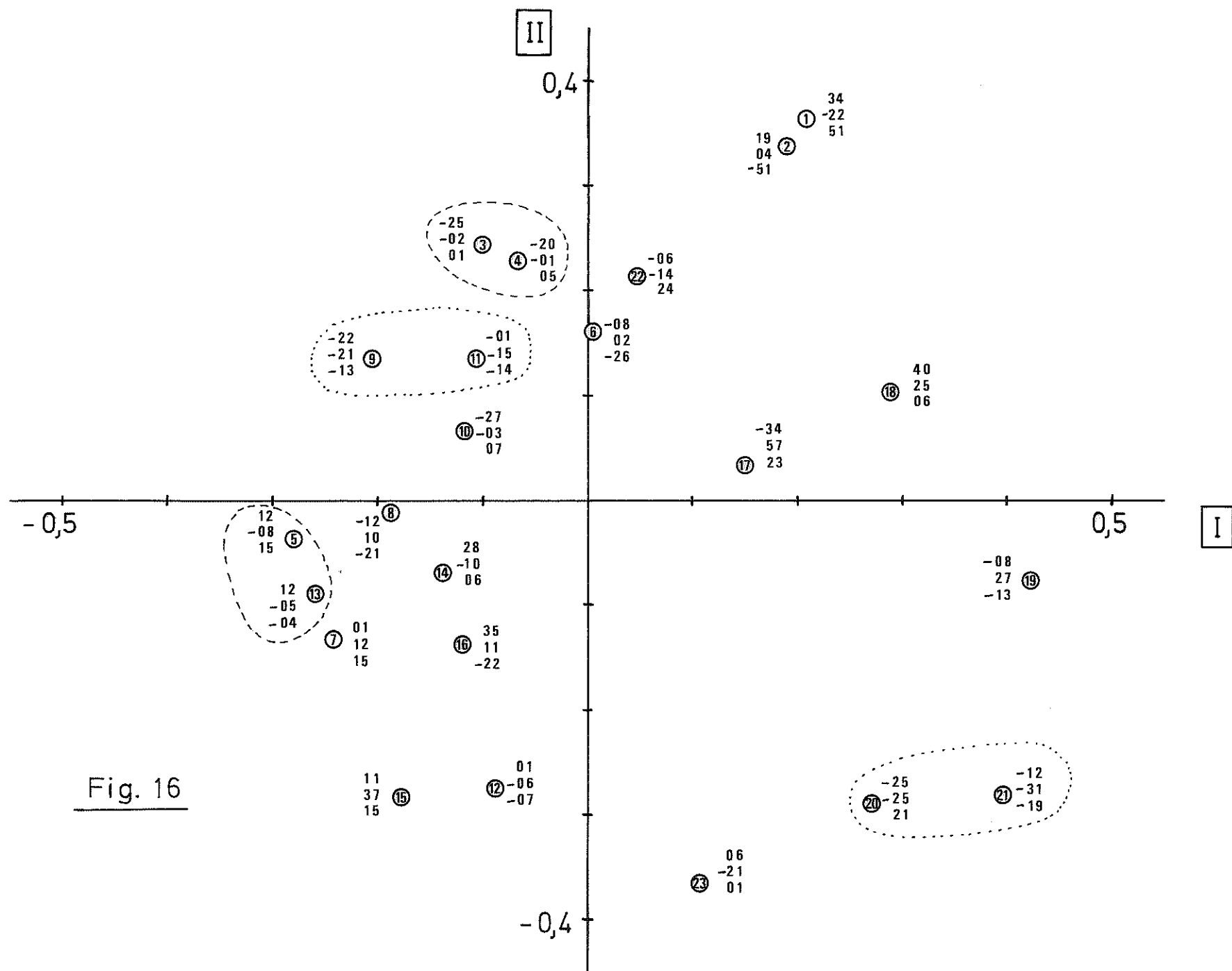


Fig. 16

borándose así la gradación de las variaciones ambientales expresada anteriormente. Además, el porcentaje de la varianza explicado por el primer eje es de sólo un 12,6 %, y va disminuyendo gradualmente en los otros, totalizando entre los cinco primeros únicamente un 47 %, lo que también da una idea de uniformidad, al no haber direcciones de variación claramente dominantes sobre las demás. (El hiperelipsoide presenta poca excentricidad).

4.5. De las relaciones irradiación-vegetación.

La comparación de la irradiación solar de las estaciones de inventario con la presencia o ausencia en ellos de especies individuales no permite extraer conclusiones fiables sobre el carácter heliófilo o sciófilo de las mismas, pues al no haber estado el muestreo diseñado para ello, la representación de las diferentes marcas de clase de irradiación es muy desigual. En la tabla 36 se ha representado la presencia o ausencia de algunas especies en función de la irradiación solar anual incidente sobre ellas. Las especies muy abundantes en la zona, como Pistacia lentiscus y Rosmarinus officinalis, están presentes a lo largo de todo el ámbito de radiación solar recibida. En cambio, la escasa presencia de especies como Olea europaea, Salsola vermiculata, y Poligala rupestris, hace poco fiables las preferencias por una mayor (en el caso de las dos primeras) o menor (para la última) irradiación, como parece indicar la tabla. Un caso extremo en este sentido es el constituido por especies presentes en un sólo inventario, de las que no se ha incluido ninguna en la tabla. Algunas de estas especies se hallan clara y coherentemente emplazadas en uno u otro extremo del ámbito de variación de la irradiación: Scabiosa cretica, Asparagus acutifolius,

Especies (Frecuencia)	Irradiación anual (Kcal/cm ²)			
	110 ↓	120 ↓	130 ↓	140 ↓
<u>Pistacia lentiscus</u> (21)	1	1 1 1	01	11 11 1
<u>Rosmarinus officinalis</u> (18)	1	1 1 1	11	10 11 1
<u>Phagnalon saxatile</u> (17)	1	1 1 1	01	11 11 1
<u>Helichrysum stoechas</u> (14)	1	1 0 1	11	00 11 1
<u>Ephedra fragilis</u> (13)	1	0 1 1	01	11 11 1
<u>Lycium intricatum</u> (12)	1	0 1 0	11	01 11 1
<u>Asparagus stipularis</u> (11)	0	1 1 0	01	10 10 1
<u>Cneorum tricocon</u> (11)	1	1 1 1	01	10 11 1
<u>Asphodelus microcarpus</u> (10)	0	1 1 1	01	00 01 0
<u>Rubia peregrina</u> (6)	1	1 1 0	01	00 00 0
<u>Arum pictum</u> (5)	1	1 0 1	01	00 00 0
<u>Asparagus albus</u> (5)	0	0 0 0	01	01 01 0
<u>Capparis spinosa</u> (3)	0	0 0 0	01	01 00 0
<u>Poligala rupestris</u> (3)	1	0 0 0	01	00 00 0
<u>Salsola vermiculata</u> (3)	0	0 0 0	01	01 00 0
<u>Olea europaea</u> (2)	0	0 0 0	01	00 10 0
<u>Phagnalon rupestre</u> (2)	1	0 0 0	00	00 10 0

Tabla 36.- Presencia (1) o ausencia (0) de las especies reseñadas, en estaciones de inventario con las irradiaciones que se indican.

(La frecuencia se refiere al número de inventarios en que la especie está presente, de los 23 realizados).

Lonicera implexa, y *Prasium majus*, en el mínimo, y *Helianthemum caput-felis* y *Fagonia cretica*, hacia el máximo; pero su escasa representación hace que sus indicaciones no resulten muy significativas.

Así pues, serán las especies con una frecuencia media de aparición las que resulten más fiables. De las especies consideradas como termófilas, algunas aparecen aquí distribuidas a lo largo de todo el rango de la irradiación (*Lycium intricatum*, *Gnecorum tricocon*, *Asparagus stipularis*), pero otras sí que parecen situarse preferentemente hacia la zona del máximo (*Asparagus albus*). *Arum pictum* y *Rubia peregrina*, por el contrario, se sitúan más bien hacia la zona de menor irradiación, como era de esperar por el carácter menos termófilo de estas especies. En el caso concreto de *Rubia peregrina*, su presencia en algunos inventarios de irradiación media-alta puede ser debida a la protección microclimática que esta especie se procura, por su carácter de liana, al crecer entre otras especies como *Pistacia lentiscus*, por ejemplo.

Hay que insistir entonces en que ni el rango de variación de la irradiación es lo suficientemente amplio, ni el muestreo lo suficientemente numeroso como para extraer conclusiones sobre las preferencias ambientales de las especies inventariadas. No obstante, el método puede ser válido aplicado en mayor escala, y teniendo en cuenta otros parámetros del medio.

En cuanto a las relaciones de la irradiación con la vegetación en su conjunto, al análisis de correlación efectuado en 3.5 permite apreciar correlaciones significativas entre la irradiación y el eje III del análisis de coordenadas principales (tabla 19).

Según algunos autores (NOY-MEIR y AUSTIN, 1970; SWAN, 1970; AUSTIN y NOY-MEIR, 1971; BEALS, 1973) los ejes de tales análisis, efectuados a partir de datos de abundancia de especies animales o vegetales únicamente, no deben interpretarse como ligados a los principales gradientes ambientales exclusivamente. Sin embargo la tentación a hacer tales correlaciones es grande, y de hecho frecuentemente se obtienen resultados positivos. En nuestro caso sucede así en una primera aproximación con el eje III, y posteriormente (tabla 20) se examina con más detalle, mes por mes, esta correlación con la irradiación. Los valores más altos del coeficiente son los de r_3 , obtenidos al aplicar una transformación logarítmica a los datos de la irradiación.

En la figura 17 se observa como va evolucionando dicho coeficiente a lo largo del año, siendo significativo a un nivel de 0,01 ($r \geq 0,526$) desde septiembre hasta marzo, o desde agosto hasta abril si rebajamos el nivel de significación a 0,05 ($r \geq 0,413$). Deja pues de ser significativa la correlación en los meses de abril a agosto (o de mayo a julio), con un mínimo en junio, esto es, en el solsticio de verano. Esta falta de significación de los valores veraniegos del coeficiente de correlación cabe achacarla, por un lado, a las menores diferencias de radiación recibida en las estaciones de inventario durante el verano, como quedó reflejado en 4.2.1, y por otro, a que en esta época, y debido a las desfavorables condiciones que la sequedad impone al desarrollo de los vegetales (véase diagrama ombrotérmico en la página 5), la vegetación no se encuentra en un periodo activo de crecimiento.

En la tabla 18 podemos ver qué especies son las que contribuyen más a este eje III del análisis multivariante. Positivamente correlacionados con él tenemos, por orden de importancia, a Rubia peregrina, Cneorum tricocon, Micromeria filiformis, y significativa únicamente a un nivel de 0,05, Cistus monspeliensis.

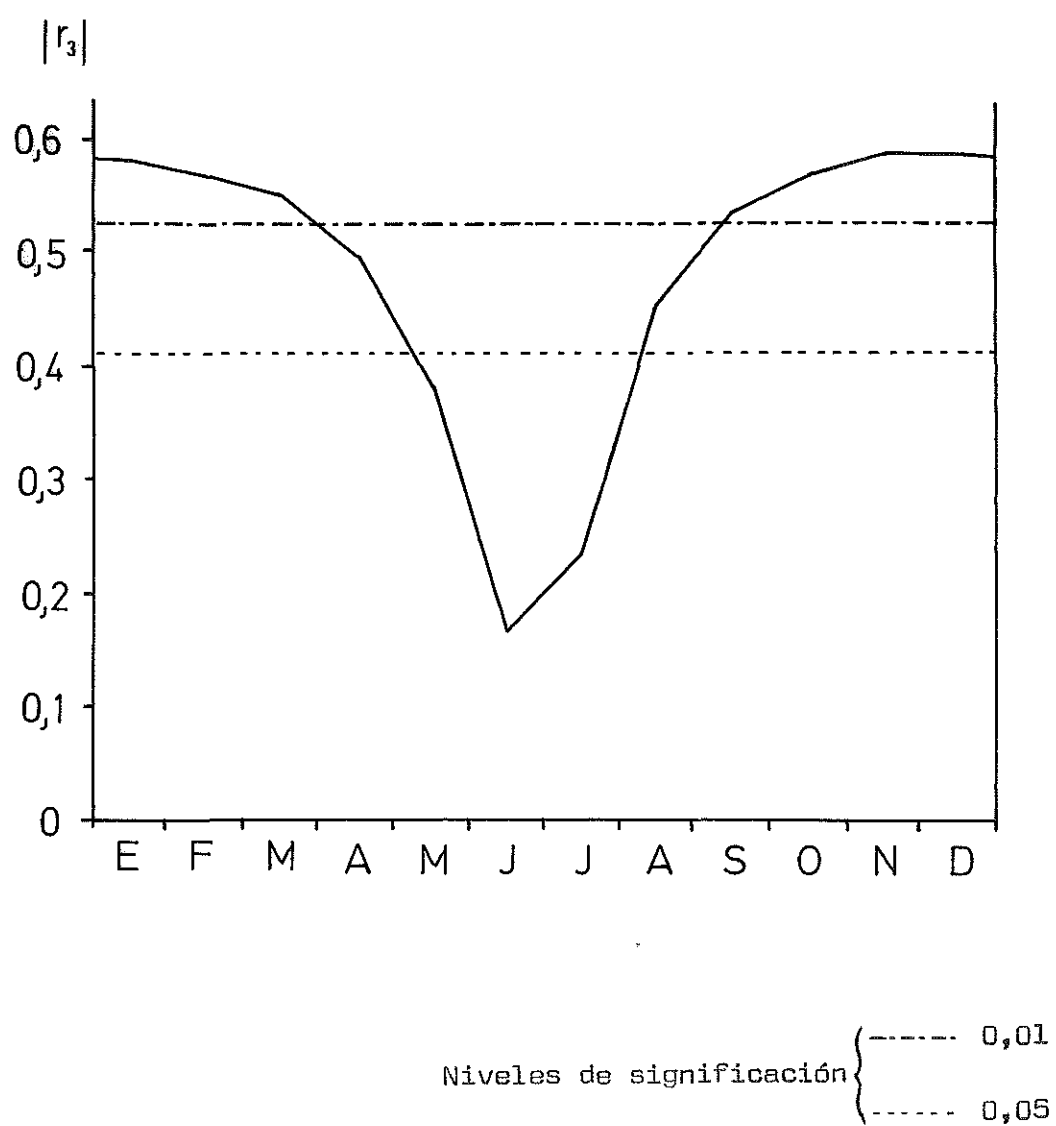


Figura 17.- Evolución anual del valor absoluto de r_3 .

sis. Como la correlación entre el eje III y la irradiación era negativa (es decir, a mayor irradiación correspondía un menor valor de la coordenda III de la estación), las especies citadas parecen ligadas preferencialmente a estaciones con menor radiación solar incidente. Esto resulta aceptable para Rubia peregrina y Micromeria filiformis, pero no así para Cistus monspeliensis y Cneorum tricocon. En el caso de Cistus monspeliensis se puede aducir la baja significación de su coeficiente de correlación con el eje III, y su escasa representación en los inventarios realizados (únicamente aparece en dos de ellos). Pero Cneorum tricocon, considerada como una especie termófila, está bien representada en los inventarios. Para explicar esta contradicción basta pensar en que, si bien el coeficiente de correlación de Cneorum tricocon es significativo, su valor no es muy alto (0,535), y al relacionar su presencia en una estación con una baja irradiación de la misma, estamos encadenando dos parejas de variables, la segunda de las cuales también está correlacionada con un valor significativo, pero igualmente bajo (-0,582, en el mejor de los casos), por lo que la fiabilidad de la relación transitiva disminuye apreciablemente.

La cobertura total de la vegetación también se correlacionó con la irradiación, además de con el porcentaje de suelo, la pendiente, y la exposición, pero únicamente la correlación con el % de suelo resultó significativa, y ello sólo a un nivel de significación de 0,05 (tabla 21). La correlación con la irradiación no es significativa, pero su signo negativo era de esperar, puesto que una mayor irradiación en un sitio árido como la zona de los taludes objeto de estudio, supone una desventaja de cara a la economía hídrica de los vegetales.

El porcentaje de suelo, la pendiente, y la exposición se correlacionaron a su vez con los ejes del análisis multivariante

(tabla 22) y, dejando aparte el atípico valor de r_3 entre la pendiente y el eje V, los únicos coeficientes significativos son los de la exposición con el eje III, pero sólo a un nivel de 0,05. Esta correlación es pues inferior a la conseguida con los valores de irradiación, y hay que atribuirle a la elevada correlación que presenta la exposición con la irradiación en este caso concreto (tabla 23), debida sin duda a la relativa uniformidad de la pendiente en la zona estudiada, que hace que la exposición sea el factor topográfico de mayor incidencia en la irradiación de las estaciones de inventario.

Hemos visto pues que existe una correlación significativa entre la vegetación y la irradiación, aunque su valor no sea muy alto. La razón de ello hay que buscarla fundamentalmente en el modo de influencia de la irradiación sobre la vegetación: no siendo la luz un factor limitante en la zona de estudio, los efectos de la irradiación se harán sentir preferentemente a través de otros términos del balance energético, que desembocarán en diferencias de temperatura y humedad entre las diversas estaciones de inventario.

En efecto; la ecuación del balance energético puede ser planteada así:

$$G_i (1-r) - D_n = F + S + H + LE$$

donde G_i es la irradiación global, r el albedo, y el resto de los símbolos representan:

D_n = Energía devuelta por la superficie como radiación neta de onda larga.

F = Energía almacenada en los vegetales como resultado del balance entre la fotosíntesis y la respiración.

S = Energía perdida por conducción al suelo.

H = " " " convección al aire.

LE = " " " evaporación. (E = cantidad de agua evaporada; L = calor latente de vaporización).

Así pues, diferencias en G_i se traducirán en diferencias en S, H, y LE, con las consiguientes modificaciones de la temperatura del suelo y del aire, y de la evapotranspiración. Estas diferencias de temperatura y evaporación han de tener evidentemente una influencia importante en la vegetación, pero resulta enmascarada por un gran número de factores como el tipo de suelo (que influencia al término S), la exposición al viento (que afecta al término H), y el contenido de agua en el suelo (que influye en LE). La orientación tendrá también una influencia adicional, puesto que como el modelo propuesto calcula irradiaciones diarias, los valores resultantes de su aplicación son idénticos en estaciones de inventario cuya inclinación y orientación sean simétricas respecto al plano norte-sur. En cambio, los valores de temperatura y evaporación serán mayores en las estaciones cuya orientación presente componente oeste que en sus simétricas orientadas a levante, por recibir la radiación preferentemente por la tarde. (En la aplicación del modelo efectuada en este trabajo no se presenta este problema, ya que las orientaciones oscilan entre WNW y S).

Si a todo ello añadimos factores extraclimáticos como la textura, aireación y composición química del suelo, y la influencia antropógena, no es de extrañar que el coeficiente de correlación entre la irradiación y la composición florística, en el tercer eje del análisis de coordenadas principales (que sólo explica un 8,5 % de la varianza), no alcance un valor muy alto.

No obstante, este valor es superior al obtenido meramente con la exposición. GRACE (1977) considera que el término "exposición" es usado con cierta ambigüedad, ya que puede ser sinónimo de orientación, o referirse a la acción de elementos climáticos como el viento o la radiación, o a una combinación de ellos. Por ello este autor considera más conveniente describir

el ambiente en términos de variables climatológicas que puedan medirse, como la temperatura y la velocidad del viento, y en ese sentido lo que se ha hecho en este trabajo es desarrollar un método que permita traducir los valores de exposición e inclinación a valores de irradiación que, aunque estimados en lugar de medidos, son ya una variable climatológica concreta.

5. CONCLUSIONES

- 1ª) Se ha desarrollado un modelo para el cálculo de la irradiación de superficies inclinadas que ofrece muy buenos resultados en días despejados, y bastante aceptables en días nublados.
- 2ª) Las variaciones de irradiación entre laderas de diferente orientación son máximas en invierno y mínimas en verano, por lo que la influencia de dichas variaciones sobre los vegetales será tanto mayor cuanto más alejada del verano esté su estación de crecimiento.
- 3ª) Para una adecuada evaluación de las irradiaciones de estaciones de inventario es aconsejable una precisión mínima en las medidas de cinco grados en la inclinación, y diez en la orientación.
- 4ª) Existe una correlación significativa entre la irradiación y la vegetación, mayor que la que presenta ésta con la mera exposición. Sin embargo su valor no es muy alto por estar enmascarada su influencia por gran número de factores, como la exposición al viento y el tipo de suelo.
- 5ª) El método propuesto para el cálculo de la irradiación de laderas resulta útil para el estudio de las relaciones ambiente-organismos de un ecosistema, bien como una primera aproximación a las condiciones energéticas del medio, bien como paso previo al cálculo pormenorizado de los balances energético e hídrico.

6. BIBLIOGRAFIA

- ACEITUNO P., A. BLANCO, J. GARMENDIA, 1978.- Contribución al estudio de la radiación solar sobre laderas en la provincia de Salamanca.- Avances sobre la invest. en Bioclim., p.107-138. Centro de Edaf. y Biol. Apl. de Salamanca.
- ANDERSON M.C., 1964.- Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions.- J. Ecol., 52: 27-41.
- AUSTIN M.P., I. NOY-MEIR, 1971.- The problem of nonlinearity in ordination: Experiments with two-gradient models.- J. Ecol., 59: 763-773.
- BARBARO S., et al., 1979.- An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation.- Solar Energy, 22: 225-228.
- BEALS E.W., 1973.- Ordination: Mathematical elegance and ecological naïveté.- J. Ecol., 61: 23-35.
- BOLLE H.J.(Ed.), 1977.- Radiation in the atmosphere.- Radiation Symposium. Garmisch-Partenkirchen. Aug.-76. Science Press. Princeton.
- BRAUN-BLANQUET J., 1972.- Plant Sociology.- Hafner Publishing Company. New York.
- BRAUN-BLANQUET J., 1979.- Fitosociología.- H. Blume ediciones.
- BRUNO R., 1978.- A correction procedure for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface.- Solar Energy, 20: 97-100.
- BUCKLUS R.O., R. KING, 1978.- Diffuse solar radiation on a horizontal surface for a clear sky.- Solar Energy, 21: 503-509.

- BUGLER J.W., 1977.- The Determination of Hourly Insolation on an Inclined Plane Using a Diffuse Irradiance Model Based on Hourly Measured Global Horizontal Insolation.- Solar Energy, 19: 477-492.
- CLIFFORD H.T., W. STEPHENSON, 1975.- An Introduction to Numerical Classification.- Academic Press.
- COULSON K.L., 1975.- Solar and Terrestrial Radiation.- Academic Press.
- DIAZ-PABON R., P. DE PABLO, 1976.- Radiación solar estimada sobre superficies horizontales e inclinadas.- IIª Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Comunicaciones, II: 1087. Presidencia del Gobierno.
- DIAZ-PABON M.R., P.J.M. DE PABLO, 1978.- Contribución al estudio climatológico de la radiación solar en España.- I.N.M., A-77. Madrid.
- DUCREY M., 1975.- Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. I. Analyse théorique de l'interception.- Ann. Sci. forest., 32: 73-92.
- DUVIGNEAUD J., 1979.- Catalogue provisoire de la flore des Baléares.- Soc. pour l'échange des Plantes Vasculaires de l'Europe Occidentale et du Bassin Méditerranéen. Fascicule nº 17 (1976-77). Supplément.
- EVANS G.C., D. E. COOMBE, 1959.- Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate.- J. Ecol., 47: 103-113.
- FRITZ S., 1951.- Solar Radiant Energy and its modification by the Earth and its atmosphere.- Am. Met. Soc. Compendium of Meteorology, p. 13-33.

- GARNIER B.J., A. OMURA, 1970.- The evaluation of surface variations in solar radiation income.- Solar Energy, 13: 21.
- GOWER J.C., 1966.- Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis.- Biometrika, 53: 325-338.
- GUEYMARD C., 1975.- Influence de la topographie sur la distribution du rayonnement solaire. Calcul théorique, cartographie et application pratique pour le Massif des Albères (P.O.). Académie de Montpellier. Université des sciences et techniques du Languedoc.(Inédito).
- GUIJARRO J.A., 1982.- Primeras medidas de irradiación solar en Palma de Mallorca. Relación con la insolación.- Bol. Soc. His. Nat. Balears, 25.(En prensa).
- HOTTEL H.C., 1976.- A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmosphere.- Solar Energy, 18: 129-134.
- HOYT D.V., 1978.- A model for the calculation of solar global insolation.- Solar Energy, 21: 27-35.
- IQBAL M., 1978.- Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface.- Solar Energy, 20: 101-105.
- JANSA J.M., E. JAUME, 1946.- El régimen de brisas en la isla de Mallorca.- Revista de Geofísica, V: 304-328.
- JANSA J.M., 1960.- Tratado de Meteorología Teórica.- Ser. Met. Nac., serie B, nos. 13, 14, 15, y 16 (4 tomos).
- KIMBALL H.H., 1919.- Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States.- Mon. Wea. Rev., 47: 769-793.

- KONDRATYEV K.Y., 1969.- Radiation en the Atmosphere.- Ac. Press.
- KONDRATYEV K.Y., 1977.- Radiation Regime of Inclined Surfaces.-
W.M.O. nº 467. Technical Note nº 152. Ginebra.
- LIU B.Y.H., R. JORDAN, 1960.- Interrelationships and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.- Solar Energy, 4: 1-19.
- LOWRY W.P., 1969.- Weather and Life: An Introduction to Biometeorology.- Academic Press.
- McARTHUR L.B., J.E. HAY, 1978.- On the Anisotropy of Diffuse Solar Radiation.- Bul. Am. Met. Soc., 59: 1442-1443.
- MADGWICK H.A.I., G.L. BRUMFIELD, 1969.- The use of hemispherical photography to assess light climate in the forest.-
J. Ecol., 57: 537-542.
- MARGALEF R., 1977.- Ecología.- Ed. Omega.
- MATEOS J., et al., 1978.- Sobre la radiación difusa en Salamanca.- Avances sobre la invest. en Bioclim., p. 311-325.
Centro de Edaf. y Biol. Apl. de Salamanca.
- NOY-MEIR I., M.P. AUSTIN, 1970.- Principal component ordination and simulated vegetation data.- Ecology, 51: 551-552.
- NUÑEZ J.M., J. PEREZ, 1976.- Hacia una estimación climatológica de la radiación solar global en España.- IIª Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica. p. 907-914.
- ONRUBIA J., J.A. MARTINEZ, F. TEJERINA, 1976.- Estudio alternativo del cálculo de la radiación solar sobre una superficie horizontal en el límite de la atmósfera.- IIª Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica. P.877-892.

- ORIOLE E., 1976.- Algunos aspectos estadísticos de la irradiación solar en la Península Ibérica.- IIª Asam. Nac. de Geodesia y Geofísica. p.893-906.
- PALTRIDGE G.W., C.M.R. PLATT, 1976.- Radiative Processes in Meteorology and Climatology.- Developments in Atmospheric Science, S. Elsevier Sci. Publ. Company.
- PROCTOR M.C.F., 1980.- Estimates from hemispherical photographs of the radiation climates of some bryophyte habitats in the British Isles.- J. of Bryology, 11: 351-366.
- PUIGSERVER M., 1971.- Notas sobre algunos aspectos de la radiación solar difusa y su variación.- Urania, 274. p.1-18.
- REVFEIM K.J.A., 1976.- Solar radiation at a site of known orientation on the Earth's surface.- J. Appl. Met., 15: 651-656.
- REVFEIM K.J.A., 1978.- A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface.- J. Appl. Met., 17: 1126-1131.
- REVUELTA J.L., et al., 1978, a.- Variaciones energéticas en laderas de diferente orientación.- Avances sobre la invest. en Bioclim., p.85-95. Centro de Edaf. y Biol. Aplicada de Salamanca.
- REVUELTA J.L., et al., 1978, b.- Influencia de la pendiente y orientación en la temperatura del suelo.- Avances sobre la invest. en Bioclim., p.96-106. Centro de Edaf. y Biol. Aplicada de Salamanca.
- SELLERS W.D., 1965.- Physical Climatology.- The University of Chicago Press.
- SLATYER R.O., 1967.- Plant-Water Relationships.- Acad. Press.
- SNEATH P.H.A., P.R. SOKAL, 1973.- Numerical taxonomy .- W.H. Freeman and Co.

SOKAL R.R., F.J. ROHLF, 1980.- Introducción a la Bioestadística.-
Ed. Reverté.

STEVEN M.D., M.H. UNSWORTH, 1979.- The diffuse solar irradiance
of slopes under cloudless skies.- *Quat. Jour. Roy. Met.
Soc.*, 105: 593-602.

SUTCLIFFE J., 1979.- Las plantas y la temperatura.- Cuadernos
de Biología. Ed. Omega.

SWAN J.M.A., 1970.- An examination of some ordination problems
by use of simulated vegetational data.- *Ecology*, 51:89-102.

TUTIN T.G., et al. (Ed), 1964, 1968, 1972, 1976, 1980.-
Flora Europaea.- Cambridge University Press. 5 Vol.

= = = = =

A P E N D I C E 1

Irradiación solar en ausencia de atmósfera: Expresiones empleadas para el cálculo, y valores obtenidos para Palma de Mallorca ($\varphi = 39,5^\circ\text{N}$).

Tras integrar para un día la irradiancia solar se obtiene (KONDRATYEV, 1969):

$$Q_0 = 2 S / \omega \cdot \rho^2 \left[\sin \varphi \cdot \sin \delta (\omega \cdot t_0) + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin(\omega t_0) \right]$$

con: $t_0 = (1/\omega) \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)$

$$\omega = 2\pi / 1440 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$$

y: $S = \text{constante solar} \approx 1,98 \text{ Ly} \cdot \text{min}^{-1}$

ρ = radio vector relativo Tierra-Sol. Se puede calcular por el método del coseno (de ONRUBIA et al., modificado):

$$\rho = 1 - 0,01673 \cos \left[(d - 5) \cdot 2\pi / 365 \right]$$

donde d es el día del año, y el ángulo se expresa en radianes. Para operar con grados sexagesimales se sustituye 2 por 360, y se tiene:

$$\rho = 1 - 0,0167 \cos[0,986(d-5)]$$

En la página siguiente se ofrece una tabla con los valores que se obtienen para una latitud de $39,5^\circ$, que corresponde aproximadamente a la de Palma de Mallorca.

		D i a					
		5	10	15	20	25	Ultimo
Ene	G_0	346	356	369	385	403	428
	Δ		2,0	2,6	3,2	3,6	4,2
Feb	G_0	451	476	503	531	561	579
	Δ		5,0	5,4	5,6	6,0	6,0
Mar	G_0	609	640	671	702	732	767
	Δ		6,2	6,2	6,2	6,0	5,8
Abr	G_0	795	822	848	871	893	914
	Δ		5,4	5,2	4,6	4,4	4,2
May	G_0	932	949	963	976	987	997
	Δ		3,4	2,8	2,6	2,2	1,7
Jun	G_0	1004	1009	1012	1013	1012	1009
	Δ		1,0	0,6	0,2	-0,2	-0,6
Jul	G_0	1004	998	990	980	968	951
	Δ		-1,2	-1,6	-2,0	-2,4	-2,8
Ago	G_0	935	918	898	877	855	825
	Δ		-3,4	-4,0	-4,2	-4,4	-5,0
Sep	G_0	800	772	744	715	685	655
	Δ		-5,6	-5,6	-5,8	-6,0	-6,0
Oct	G_0	625	594	565	536	508	476
	Δ		-6,2	-5,8	-5,8	-5,6	-5,3
Nov	G_0	451	428	407	389	372	359
	Δ		-4,6	-4,2	-3,6	-3,4	-2,6
Dic	G_0	348	340	335	333	334	339
	Δ		-1,6	-1,0	-0,4	0,2	0,8

G_0 = Irradiación solar en ausencia de atmósfera (Ly).

Δ = Incremento medio diario de G_0 (Ly).

Datos calculados para Palma de Mallorca

($\varphi = 39,5^\circ$; Cte. solar = 1,98 Ly/min)

A P E N D I C E 2

Programa en lenguaje BASIC para el cálculo de la
irradiación de superficies inclinadas.

```

10 PI=3.14159
20 INPUT "LATITUD (GRADOS): ";L:L1=L*PI/180
30 INPUT "INSOLACION RELATIVA (%): ";S:S1=S/100
40 INPUT "IRRADIACION SOLAR EN LA HORIZONTAL: ";G
50 INPUT "INCLINACION (GRADOS): ";I:I1=I*PI/180
60 INPUT "ORIENTACION (GRADOS): ";A:A3=(A-180)*PI/180
70 INPUT "DIA DEL AÑO (o A 365): ";D
80 J=.01721*(D+9.5)
90 D2=-((23.5*COS(J))+.4*(1-COS(2*J)))
100 D1=D2*PI/180
110 Q=0:P=0
120 H=.1309
130 Z1=SIN(L1)*SIN(D1)+COS(L1)*COS(D1)*COS(H)
140 Z=-ATN(Z1/SQR(-Z1*Z1+1))+1.5708
150 IF Z1<=0 THEN 250
160 A1=(SIN(L1)*Z1-SIN(D1))/(COS(L1)*SIN(Z))
170 A2=-ATN(A1/SQR(-A1*A1+1))+1.5708
180 R1=COS(I1)+SIN(I1)*TAN(Z)*COS(A2-A3) * IF R1<0. THEN R1=0.
190 Q1=Z1*.7*(1/Z1)
200 Q=Q+Q1
210 P=P+R1*Q1
220 H=-H:IF H>=0 THEN 240
230 A2=-A2:GOTO 180
240 H=H+.2618:GOTO 130
250 R=P/Q:K=1-.9*S1
260 G1=G*((1-K)*R+K)
270 PRINT "IRRADIACION CALCULADA: ";G1
280 GOTO 30

```

Datos de prueba:

Entradas: 39.5 ; 90 ; 230 ; 30 ; 180 ; 365 ;

Salida: 411.327

A P E N D I C E 3

Radiación solar: Terminología y conversión de unidades.

Definiciones:

Radiación.- Energía electromagnética emitida, propagada o recibida.

Irradiación.- Cantidad total de energía electromagnética recibida por la superficie irradiada durante el tiempo considerado.

Irradiancia.- Cantidad total de energía electromagnética que incide o atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo.

El término radiación es sin embargo el más comúnmente usado, aunque muchas veces dicho uso sea impropio. De acuerdo con estas definiciones, en este trabajo se habla indistintamente de irradiación de una superficie, o radiación recibida en o por una superficie.

Conversión de unidades de flujo de energía y potencia:

$$1 \text{ Ly} = 1 \text{ cal.cm}^{-2} = 4,18 \text{ Jul.cm}^{-2}$$

$$1 \text{ Jul.cm}^{-2} = 0,239 \text{ Ly}$$

$$1 \text{ Ly.min}^{-1} = 0,697 \text{ Kw.m}^{-2} = 69,7 \text{ mw.cm}^{-2}$$

$$1 \text{ Kw.m}^{-2} = 1,43 \text{ Ly.min}^{-1}$$